



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

Concepção e Avaliação de Concentradores Solares do Tipo Disco e Lente de Fresnel para Dessalinização de Água

Gustavo Otero Prado
Uberlândia
2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

Concepção e Avaliação de Concentradores Solares do Tipo Disco e Lente de Fresnel para Dessalinização de Água

Gustavo Otero Prado

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, Área de Concentração em Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia-MG
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

P896c Prado, Gustavo Otero, 1983-
2015 Concepção e avaliação de concentradores solares do tipo disco e
 lente de fresnel para dessalinização de água / Gustavo Otero Prado. -
 2015.
 90 f. : il.

Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.
Coorientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.


1. Engenharia química - Teses. 2. Energia solar - Teses. 3.
Dessalinização da água - Teses. 4. Aquecimento solar - Teses. I.
Damasceno, João Jorge Ribeiro. II. Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976-
III. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0


Concepção e Avaliação de Concentradores Solares do Tipo Disco e Lente de Fresnel para Dessalinização de Água

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de doutor em Engenharia Química, em 29 de Julho de 2015.

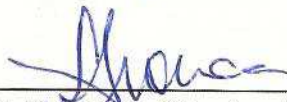
BANCA EXAMINADORA




Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
Orientador - PPGEQ/UFU



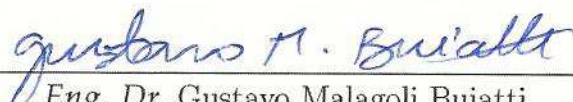
Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
Orientador - PPGEQ/UFU




Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca
PPGEQ/UFU



Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoli
PPGEQ/UFU



Eng. Dr. Gustavo Malagoli Buiatti
Alsol Energias Renováveis



Prof. Dr. Zaqueu Ernesto da Silva
CEAR/UFPB

Àqueles que têm sede.

Agradecimentos

Agradeço ao Sol, que de maneira solícita, harmônica e disciplinada me ensinou e ensina a buscar meu próprio brilho, a olhar para todos com os mesmos olhos, a melhorar meus hábitos e a entender que sempre existe um novo ciclo.

Agradeço a água, não só por saciar minha sede, mas por permitir observá-la em sua transformação, em sua flexibilidade, em seu assentamento e que, gota a gota, me fez ser mais paciente e grato.

Agradeço aos meus pais, Jerson e Zélia, que ansiosamente esperam que essa fase acabe, sem sequer imaginar que isso é só o começo.

Agradeço aos meus irmãos, Rildo e Filipe, pela silenciosa, mas verdadeira, cumplicidade.

Agradeço à Liliane, por me ajudar a separar um dia de outro em cada telefonema de boa noite.

Agradeço ao Paulo, à Bel, ao Vinícius e à Geovana, por me receberem e me hospedarem com tanta gentileza e hospitalidade.

Aos amigos que fiz e que farei, em seus mais variados nomes, idades e individualidades, por me lembrarem que juntos somos um, não no futuro, não no presente, no agora.

Agradeço aos meus inimigos, sábios mestres, que me recordam das teias sombrias que ainda existem no meu Ego, me ensinando a ser vigilante, tolerante, e a ter mais acuidade.

Agradeço aos Professores João Jorge Ribeiro Damasceno e Luiz Gustavo Martins Vieira, pela orientação deste trabalho, pela confiança, mesmo que às vezes desconfiada, pelo tempo dedicado em cada reunião, em cada estratégia, problema e solução.

Agradeço aos técnicos, prestadores de serviço e professores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia que, em conjunto, esforçam-se para que a qualidade desse curso seja sempre melhorada.

Agradeço aos membros da banca, por dedicarem tempo, esforço e atenção para pontuar cada falta de pontuação visando o enriquecimento deste trabalho.

Agradeço à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo incentivo à pesquisa.

Agradeço a você leitor, pelo interesse referente ao tema e que esse trabalho, com a ajuda da sua intuição, de alguma forma, lhe inspire a buscar soluções para o bem da humanidade. Talvez elas já estejam disponíveis esperando ser observadas por um bom observador.

E por fim, agradeço a Deus, pois, assim como os que se rebaixam serão elevados e os que se elevam serão rebaixados, os últimos serão os primeiros. Gratidão.

*“Três coisas não podem ser escondidas por muito
tempo: o Sol, a Lua e a Verdade.”
(Sidarta Gautama)*

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xix
Simbologia	xxi
Resumo	xxvii
Abstract	xxix
1 Introdução	1
2 Fundamentação Teórica	5
2.1 Energia Solar	6
2.1.1 A Estrutura do Sol	6
2.1.2 Relações entre o Sol e a Terra	9
2.1.3 Radiação Solar	18
2.2 Concentrador Solar	22
2.2.1 Parâmetros de Caracterização	22
2.2.2 Tipos de Concentradores	27
2.3 Destilação	34
2.4 Evaporador Solar	35
2.4.1 Histórico	35
2.4.2 Mecanismo	36

2.4.3	Modelos	36
2.5	Água	42
2.5.1	Estrutura Molecular	43
2.5.2	Densidade	43
2.5.3	Tensão Superficial	44
2.5.4	Água Destilada	44
2.5.5	Propriedades Coligativas	45
2.5.6	Salinidade	45
2.5.7	Condutividade Elétrica	47
3	Materiais e Métodos	49
3.1	Localização Geográfica	49
3.2	Planejamento e Construção da Unidade Experimental	50
3.2.1	Definição da Curvatura da Calha para o CSD	50
3.2.2	Dinâmica de Aquecimento do Corpo de Prova nos Concentradores Solares (CSD e CSLF)	53
3.2.3	Orientação do Coletor Solar	57
3.3	Metodologia Experimental	60
3.3.1	Parametrização	60
3.3.2	Preparação da Solução	62
3.3.3	Montagem da Unidade Experimental	63
3.3.4	Apontamento Inicial	65
3.3.5	Dessalinização	65
3.3.6	Planejamento Fatorial 3^2	66
3.4	Materiais	67
3.4.1	Sistema de Rastreamento	68
3.4.2	Sistema Concentrador por Disco Cromado	68
3.4.3	Sistema Concentrador por Lente de Fresnel	69
4	Resultados e Discussão	71

4.1	Planejamento e Construção da Unidade	71
4.1.1	Definição da Curvatura da Calha	72
4.1.2	Previsão da Dinâmica de Aquecimento	78
4.1.3	Protótipo	79
4.2	Resultados Experimentais	85
4.2.1	Parâmetros do Concentrador Solar de Disco	85
4.2.2	Parâmetros do Concentrador Solar Lente de Fresnel	92
4.2.3	Dessalinização	96
4.2.4	Planejamento Fatorial	105
5	Conclusão e Sugestões	115
	Referências Bibliográficas	119
A	Algoritmo de Rastreamento Solar	131
A.1	Descrição da Função	131
A.2	Função $\arctg2$	133
B	Radiação Solar	135
C	Propriedades Termofísicas do Ar	141
C.1	Regressão Polinomial	141
D	Declinação Magnética	145
E	Unidades Experimentais	147

LISTA DE FIGURAS

2.1	Estrutura interna do Sol	6
2.2	Movimento de rotação e translação da Terra	10
2.3	Representação do plano da eclíptica	11
2.4	Representação dos solstícios e equinócios	11
2.5	Referenciais para orientação celeste	12
2.6	Ângulos entre uma superfície plana e a posição do Sol	13
2.7	Ângulos da longitude	14
2.8	Ângulos da latitude	15
2.9	Coordenadas horizontais ou alto-azimutais	15
2.10	Coordenadas equatoriais	16
2.11	Projeção da demanda energética do mundo	18
2.12	Espectro de ondas eletromagnéticas	20
2.13	Área de abertura	23
2.14	Referência para o ângulo limite em concentradores solares	23
2.15	Ângulo limite em um sistema ideal e em sistemas não ideais	24
2.16	Ângulo de borda de uma parábola	24
2.17	Radiação interceptada por um absorvedor	25
2.18	Concentrador solar plano	27
2.19	Concentrador Solar Composto (CPC)	29
2.20	Concentrador Solar Cilíndrico (CSC)	30
2.21	Concentrador Solar de Disco (CSD)	31

2.22	Concentrador solar de torre	32
2.23	Lente de Fresnel	33
2.24	Corte transversal em um evaporador solar aberto	36
2.25	Corte transversal em um evaporador solar simples	37
2.26	Evaporador solar de múltiplo efeito com três estágios	38
2.27	Evaporador solar de mecha	39
2.28	Evaporador solar via umidificação-desumidificação	40
3.1	Procedimentos para encontrar o foco de uma curvatura	51
3.2	Balanco de energia em um corpo de prova cilíndrico	53
3.3	Subdivisão do disco absorvedor	61
3.4	Balanceamento do eixo da Ascensão Reta	64
3.5	Correção do polo norte verdadeiro por declinação magnética	64
3.6	Distribuição dos termopares no sistema para medida de temperatura	65
3.7	Sistema de rastreamento equatorial	68
3.8	Fluxograma de produção do CSLF	70
4.1	Reflexão de raios solares em um concentrador plano	73
4.2	Concentração de raios para uma superfície plana	73
4.3	Reflexão de raios em uma superfície circunferencial	74
4.4	Concentração de raios para superfície circunferencial	74
4.5	Instalação de concentradores solares esféricos em série	75
4.6	Reflexão de raios em uma superfície senoidal	76
4.7	Concentração de raios para superfície senoidal	77
4.8	Reflexão de raios em uma superfície parabólica	77
4.9	Simulação de aquecimento de uma parábola refletora com reflexão e absorção integral dos raios solares	78
4.10	Vista explodida do Concentrador Solar de Disco	80
4.11	Evolução do evaporador para o CSD	81
4.12	Posicionamento do líquido no absorvedor	82

4.13 Alinhamento do eixo do contrapeso e do centro do absorvedor	82
4.14 Evolução do condensador	83
4.15 Vista explodida do Concentrador Solar de Lente de Fresnel	84
4.16 Evolução do evaporador (CSLF)	85
4.17 Duas curvaturas a uma distância focal de 53,5 cm	86
4.18 Área mapeada do fator de interceptação conforme o tamanho do absorvedor para o CSD	87
4.19 Área de concentração atuante na parábola	88
4.20 Dinâmica de aquecimento utilizando um CP com diâmetro maior	89
4.21 Dinâmica de aquecimento utilizando um CP com diâmetro menor	90
4.22 Eficiência térmica instantânea ao longo do experimento no CSD	91
4.23 Área mapeada do fator de interceptação conforme o tamanho do absorvedor no CSLF	92
4.24 Área de concentração atuante na Lente de Fresnel	93
4.25 Dinâmica de aquecimento utilizando um CP maior para o CSLF	94
4.26 Dinâmica de aquecimento utilizando um CP menor para o CSLF	95
4.27 Eficiência térmica instantânea ao longo do experimento para o CSLF	96
4.28 Produção de água destilada para diferentes concentrações de sal marinho no CSD	97
4.29 Temperatura de ebulição e produção de água destilada considerando a área atuante do CSD	98
4.30 Eficiência de resfriamento do condensador para o CSD	99
4.31 Produção de água destilada ao longo do dia para o CSD	100
4.32 Produção horária e ao longo do dia no CSD	100
4.33 Produção de água destilada acumulada ao longo do dia no CSD	101
4.34 Produção de água destilada para diferentes concentrações de sal marinho no CSLF	102
4.35 Temperatura de ebulição e produção de água destilada considerando a área atuante do CSLF	102
4.36 Eficiência de resfriamento do condensador no CSLF	103
4.37 Produção de água destilada ao longo do dia no CSLF	104

4.38	Produção de água destilada acumulada ao longo do dia no CSLF	104
4.39	Produção de água destilada com uma carga baixa de solução	106
4.40	Produção de água destilada com uma carga média de solução	108
4.41	Produção de água destilada com uma carga alta de solução	109
4.42	Produção de água destilada com concentração fixa e variação de carga . . .	110
4.43	Análise das variáveis significativas no processo de dessalinização	112
4.44	Superfície de resposta e curva de contorno para produtividade	112
B.1	Correlação entre o Sol e a Terra	139
C.1	Regressões polinomiais das propriedades termofísicas do ar	143
D.1	Declinação magnética média	145
E.1	Unidade experimental do concentrador solar de disco e da Lente de Fresnel	147

LISTA DE TABELAS

2.1	Dia médio do mês e valores de n	17
2.2	Densidade da água	44
2.3	Salinidade média de oceanos e mares	46
3.1	Parâmetros das funções geradoras	53
3.2	Características do sal marinho	63
3.3	Matriz de planejamento	67
3.4	Instrumentos de medição	70
4.1	Fator de intercepção para superfícies circunferenciais em função do raio da curvatura	75
4.2	Rampa de aquecimento experimental para o CSD	91
4.3	Rampa de aquecimento no CSLF	95
4.4	Matriz de planejamento fatorial	111
C.1	Propriedades termofísicas do ar à pressão atmosférica	141

SIMBOLOGIA

- A_a - área de topo da calha do concentrador [m^2]
- A_{abs} - área superficial do absorvedor [m^2]
- A_f - fator geométrico [-]
- AR - ascensão reta [$^\circ$]
- c - velocidade da luz [m.s^{-1}]
- C - índice de concentração [sol]
- C_{abs} - percentual dos raios que atingem o absorvedor [sol]
- C_{max} - índice de concentração máxima [sol]
- CSD - Concentrador Solar de Disco
- CPC - Concentrador Solar Parabólico Composto
- c_p - calor específico do corpo de prova [$\text{cal.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$]
- c_{p-ar} - calor específico do ar [$\text{cal.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$]
- CSC - Concentrador Solar Cilíndrico
- C_m - carga mássica da solução no absorvedor [g]
- D - diâmetro do corpo de prova cilíndrico [-]
- d_h - distância horizontal entre as extremidades da parábola [m]
- d_v - distância vertical entre a extremidade e o centro da curvatura [m]
- DEC - Declinação
- e^+ - pósitron [-]
- E - equação do tempo [min]
- EC - Esfera Celeste
- E_o - anomalia excêntrica [$^\circ$]

- E_r - fluxo de energia radiante [W.m^{-2}]
- f - distância focal [m]
- $F_{C \rightarrow V}$ - fator de forma entre o corpo de prova e a vizinhança [-]
- g - aceleração gravitacional [m.s^{-2}]
- Gr - Número de Grashof [-]
- G_{SC} - constante solar [W.m^{-2}]
- h - coeficiente convectivo de transferência de calor [$\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$]
- H_L - horário local [h]
- i - dia do mês [-]
- i_o - inclinação orbital [°]
- k - condutividade térmica [$\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$]
- K_{15} - razão entre a condutividade mensurada e a padrão [-]
- k_T - índice de claridade horário atmosférico [-]
- K_T - índice de claridade diário [-]
- k_p - Constante de Planck [J.s]
- L - comprimento do corpo de prova cilíndrico [m]
- $\overline{L_o}$ - longitude média do Sol [°]
- L_{loc} - longitude do observador em graus oeste [°]
- L_{st} - longitude do meridiano padrão [°]
- m - massa de ar [kg]
- m_i - mês do ano [-]
- M_o - anomalia média de um período [°]
- N - duração da luz solar [h]
- ND - número do dia [-]
- n - dia do ano [-]
- n_m - índice de refração do meio [-]
- Nu - Número de Nusselt [-]
- o_{ecl} - obliquidade da eclíptica [°]
- P - produção de água destilada [g.dia^{-1}]

P_a - produção de água destilada acumulada [mL.h⁻¹]

PNC - Polo Norte Celestial

Pr - Número de Prandtl [-]

PSC - Polo Sul Celestial

q_{conv} - taxa de energia perdida por convecção externa [W]

q_e - taxa de radiação emitida pelo absorvedor [W]

q_{rm} - irradiação média registrada pelo INMET [W.m⁻²]

q_r - taxa de radiação refletida pelo absorvedor [W]

q_{ri} - taxa de radiação que chega até o absorvedor por reflexão/refração [W]

q_u - taxa de energia útil fornecida pelo concentrador [W]

R - distância entre a Terra e o Sol [km]

r - raio do Sol [km]

Ra - Número de Rayleigh [-]

R_b - razão entre a radiação direta horária nas superfícies inclinada e plana [-]

t - tempo [s]

T - temperatura do fluido em cada instante [°C]

T_{abs} - temperatura do absorvedor [°C]

T_o - temperatura de entrada do condensador [°C]

T_f - temperatura de saída do condensador [°C]

Tp - tempo padrão [h]

Ts - tempo solar [h]

Tc - tempo civil [h]

T_∞ - temperatura ambiente [°C]

t_{max} - tempo para atingir a temperatura máxima [s]

U_l - coeficiente de perdas de energia [W.m⁻².K⁻¹]

UD - umidificação-desumidificação

L_o - longitude verdadeira do Sol [°]

V - volume do corpo de prova [m³]

v - frequência da radiação [s⁻¹]

v_o - anomalia verdadeira [°]

x_e - eixo x das coordenadas equatoriais do Sol [°]

x_o - eixo x das coordenadas retangulares do Sol [°]

x_p - coordenada x do ponto P [m]

W - comprimento do centro até a extremidade do absorvedor [m]

y_i - ano correspondente [-]

y_e - eixo y das coordenadas equatoriais do Sol [°]

y_o - eixo y das coordenadas retangulares do Sol [°]

y_p - coordenada y do ponto P [m]

z_e - eixo z das coordenadas equatoriais do Sol [°]

z_o - eixo z das coordenadas retangulares do Sol [°]

Nomenclatura da Radiação

G - irradiância [W.m^{-2}]

H - irradiação solar total medida em um dia [$\text{J.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$]

I - irradiação solar total horária, irradiação ou exposição radiante [$\text{J.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$]

subscritos

b - direto

d - difuso

i - incidente

n - normal

T - no plano inclinado

o - extraterrestre

Letras gregas

α - ascensão reta [°]

α_{abs} - absorbância do absorvedor [-]

α_{s-md} - altura solar máxima [°]

- α_o - semieixo maior da órbita [°]
 β - inclinação da superfície coletor solar [°]
 β - coeficiente de expansão volumétrica [K⁻¹]
 δ - declinação solar [°]
 ϵ - emissividade do corpo de prova [%]
 η - eficiência térmica instantânea [-]
 η_o - eficiência óptica [-]
 η_r - eficiência de resfriamento [-]
 e_o - excentricidade da órbita [°]
 γ - fóton gama
 γ_i - fator de intercepção óptico [-]
 γ_{pv} - ponto vernal
 γ_{sn} - azimuth de superfície [°]
 λ - longitude [°]
 λ_{loc} - longitude local do observador [°]
 λ_{st} - longitude meridiano padrão (fuso horário) [°]
 λ_o - comprimento de onda [m]
 θ - ângulo de incidência [°]
 θ_f - ângulo entre a normal e o raio refletido [°]
 θ_{lim} - ângulo limite [°]
 θ_{max} - ângulo de incidência máximo [°]
 θ_s - ângulo subentendido entre o Sol e a Terra [°]
 θ_z - ângulo zenital [°]
 μ - viscosidade dinâmica [kg.m⁻¹.s⁻¹]
 ν - viscosidade cinemática [m².s⁻¹]
 ϕ - latitude [°]
 ϕ_r - ângulo de borda [°]
 ρ - densidade do material [kg.m⁻³]
 ρ_p - refletividade do material refletor [%]

ρ_c - refletividade do corpo de prova [%]

σ - Constante de Stefan-Boltzmann [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$]

τ_v - transmitância do material de cobertura do absorvedor [%]

Θ - concentração de sal marinho [%]

ω - ângulo horário [$^\circ$]

ω_s - ângulo horário do pôr do sol ou do nascer do sol [$^\circ$]

ω_{ns} - hora do nascer do sol [h]

ω_{ps} - hora do pôr do sol [h]

φ_r - ângulo de borda [$^\circ$]

φ_s - ângulo da altura solar [$^\circ$]

Parâmetros das Funções Geradoras

α_f - coeficiente linear [m]

β_f - coeficiente angular [-]

φ_f - parâmetro de deslocamento do centro da circunferência pelo eixo y [m]

ρ_f - raio da circunferência [m]

λ_f - parâmetro de deslocamento do centro da circunferência pelo eixo x [m]

γ_f - parâmetro de amplitude da função senoidal [m^{-1}]

μ_f - parâmetro de direção da concavidade [-]

ψ_f - parâmetro de deslocamento da função senoidal pelo eixo y [m]

δ_f - parâmetro de amplitude da função parabólica [m^{-1}]

τ_f - parâmetro de deslocamento da função parabólica pelo eixo y [m]

Resumo

O Sol é a principal fonte de energia da Terra. Sua capacidade energética pode ser considerada inesgotável, não produz resíduos e possui alocação adaptável. Também de forma abundante, a água salgada é disponibilizada no planeta cobrindo a maior parte da superfície terrestre. No entanto, hoje, mais de um bilhão de pessoas em todo o mundo não têm acesso à água limpa. Neste cenário, a obtenção de água potável pelo processamento de águas salgadas torna-se fundamental. Logo, esse trabalho teve como objetivo a utilização da energia solar para dessalinizar água através de concentradores solares, dos tipos: disco (CSD) e Lente de Fresnel (CSLF). Para isso, um estudo teórico considerando conceitos de óptica geométrica foi implementado a fim de se investigar, dentre quatro funções matemáticas, a que melhor concentrava os raios solares. Da mesma forma, uma simulação computacional possibilitou a análise de uma dinâmica de aquecimento através de equações fundamentais dos Fenômenos de Transporte. Assim, dois protótipos foram construídos utilizando uma antena parabólica de satélite, uma Lente de Fresnel de um retroprojektor, um tripé com fins de astrofotografia e um sistema de destilação simplificado. Esses dispositivos foram caracterizados experimentalmente e a produção de água destilada foi averiguada considerando soluções de 0% a 4% de sal marinho. Em seguida, a produtividade dos concentradores solares foram comparadas e um experimento fatorial determinou matematicamente as condições de otimização do sistema. Como resultados, a superfície parabólica foi a que apresentou o maior fator de interceptação sendo por isso escolhida como modelo do protótipo. A dinâmica de aquecimento simulada foi validada experimentalmente sendo que a maior temperatura atingida foi de 319°C com uma rampa de aquecimento que chegou a $75,56^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$. Na parte da construção do protótipo, a antena parabólica foi espelhada através de um processo de cromação e tanto o evaporador quanto o condensador foram modificados ao longo dos testes até assumirem o formato adotado nos experimentos. Em termos de produtividade de água destilada, os melhores resultados foram de $4,95 \text{ kg}.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o CSD e $5,40 \text{ kg}.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o CSLF. A carga mássica foi a variável mais significativa indicada pelo Planejamento de Experimentos que também foi influenciado pelas propriedades coligativas da água. Assim, esse equipamento atende uma demanda local por água devido ao fato de dessalinizar e desinfetar águas salobras e salgadas sendo capaz de saciar, a cada 1 m^2 de captação dos raios solares, a sede de pelo menos dois adultos.

Palavras-chave: *energia solar, dessalinização, concentrador solar, destilador solar, Lente de Fresnel, concentrador solar de disco.*

Abstract

The Sun is the main source of energy on Earth. Its energy capacity can be considered inexhaustible, it does not produce waste and has an adaptive allocation. Also in abundance, salt water is available on the planet covering most of the Earth's surface. However, today, more than one billion people around the world do not have access to clean water. In this scenario, the production of drinking water by desalination of salt water becomes fundamental. Therefore, this study aimed to the use of solar energy to desalinate water through solar concentrators, the disc types (CSD) and Fresnel lens (CSLF). For this, a theoretical study considering geometrical optics concepts was implemented to investigate, among four surfaces, the best that concentrated the sun's rays. In the same way, a computer simulation enabled the analysis of a dynamic heating through fundamental equations of Transport Phenomena. Thus, two prototypes were constructed using: a satellite dish, a Fresnel lens for an overhead projector, a tripod with astrophotography purposes and a simplified distillation system. These devices were experimentally characterized and the production of distilled water was determined considering solutions with 0% to 4% of sea salt. Therefore, the productivity of solar concentrators were compared, and a factorial experiment determined mathematically, system optimization conditions. As a result, the parabolic surface was the one with the biggest factor interception was therefore chosen as the prototype model. The simulation of the heating dynamics were validated experimentally and the highest temperature reached was of 319°C with a heating ramp that reached 75.56°C.min⁻¹. In the construction of the prototype, the dish was mirrored by a chroming process and both the evaporator and the condenser was modified during the testing to take the format adopted in the experiments. In terms of productivity, the best results were 4.95 kg.m⁻².day⁻¹ for the CSD and 5.40 kg.m⁻².day⁻¹ for CSLF. The mass loading was the most significant variable indicated by the design of experiments but was also influenced by colligative properties of the water. Therefore, this equipment meets a local demand for water due to the fact desalinate and disinfect brackish and salt water being able to satisfy, every m² captured from sun's rays, the thirst of at least two adults.

Keywords: *solar energy, desalination, solar concentrator, solar still, Fresnel lens, solar dish concentrator.*

CAPÍTULO 1

Introdução

O Sol é a estrela central do sistema solar sendo a principal fonte de energia da Terra. Sua capacidade energética, absorvida pelo globo terrestre, equivale a explosão de 1200 bombas atômicas (Nagasaki) por segundo (BRYANT, 1997) e pela escala de vida humana pode ser considerada inesgotável, já que o seu tempo de vida útil se estende a bilhões de anos (FILHO; SARAIVA, 2004).

Ao contrário das fontes convencionais, tais quais o carvão, o urânio e o petróleo, a energia solar não produz resíduos, o que a conceitua como limpa, assim como são a eólica, a geotérmica e a das marés. Seu sistema de captação é adaptável, podendo ser interceptada preferencialmente em ambientes áridos e semi-áridos a exemplo dos desertos e do sertão. Em contrapartida, pode ser captada também, em ambientes urbanos através de telhados, vidros e fachadas.

Uma outra vantagem é o fato de ser lucrativa, consequência da utilização do carbono como moeda financeira, o crédito carbono, negociada internacionalmente. Da mesma forma, as concessionárias compram a energia excedente produzida por residências e indústrias distribuindo-a pelas linhas de transmissão convencionais. Sendo assim, o consumo de energia sem resíduos pode gerar créditos tanto para o consumidor quanto para o país.

Isto posto, desde a Crise do Petróleo, a energia solar é motivo de debates internacionais. A título de exemplo, o Congresso Internacional promovido pela UNESCO em 1973 teve como tema “O Sol a serviço da humanidade” e já elaborava estratégias preventivas para um possível racionamento energético (PALZ, 2002). No Brasil, a compra de painéis fotovoltaicos e aquecedores de água ainda é discreta, mas vem sendo incentivada com a redução de impostos e a instalação em programas de casas populares. Dado que o territó-

rio brasileiro possui a quinta maior área do mundo, com aproximadamente 8.515.876 km² (IBGE, 2013), e que grande parte de sua extensão possui níveis altos de irradiação, podendo chegar a 19,7 MJ.m⁻².dia⁻¹ (TIBA, 2000), o país tem um imenso potencial de mercado.

No entanto, um outro desafio a ser considerado é o da escassez de água. Isso porque do total de água disponível no planeta, 97,5% são de águas salgadas ou salobras, restando apenas 2,5% de água doce em que: 70% são de geleiras, 29% são de aquíferos e apenas 1%, ou seja, 0,025% do total das águas são de rios e lagos. Segundo Wambeke (2007), representando o departamento de recursos hídricos da Agência das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), em 2025 dois terços da população sofrerão com a falta de água.

Isso porque, hoje, mais de um bilhão de pessoas em todo o mundo já não têm acesso à água limpa para suprir as necessidades básicas e mais de 2,5 bilhões não têm saneamento básico adequado. No Brasil, em 2014, os reservatórios chegaram a níveis tão baixos que dezenas de cidades tiveram seu abastecimento racionado, prejudicando a agricultura, o comércio, as indústrias e as residências.

Neste cenário, a obtenção de água potável pelo processamento de águas salobras ou de águas marítimas torna-se fundamental. Muitas técnicas são possíveis para esse tratamento conforme citado por Daniels (1980) que incluem, entre outras, a evaporação, as trocas iônicas, a osmose reversa e os tratamentos eletroquímicos.

Consequentemente, tendo em vista as regiões com poucos recursos hídricos e de difícil acesso, o estudo deste trabalho visou ao planejamento e à construção de concentradores solares e de um evaporador para produção de água dessalinizada a partir da energia solar.

A escala do equipamento foi laboratorial, no entanto, os resultados foram apresentados por unidade de área do concentrador. Com isso, o planejamento de protótipos maiores pode ser feito, de acordo com o volume de produção necessário ou a quantidade de pessoas a serem atendidas. Contudo, por se tratar de um concentrador solar formador de imagem focal, a eficiência do equipamento depende de condições meteorológicas em que predominam um céu aberto. Foi um projeto integrante do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (PPGEQ-UFU).

Logo, este trabalho teve como objetivos geral a construção de um evaporador solar para dessalinização de água e como objetivos específicos:

1. Planejar e construir concentradores solares, de foco pontual, dos tipos disco e Lente de Fresnel;
2. Propor um sistema de evaporação e condensação, acoplado ao concentrador, para

dessalinizar águas salobras e salgadas utilizando energia solar como fonte de calor;

3. Caracterizar o equipamento em termos dos parâmetros clássicos que envolvem os concentradores solares e através de uma dinâmica de aquecimento;
4. Estudar as variações da carga mássica e do efeito coligativo em relação à produção de água potável.

As principais contribuições desta tese em termos de programação computacional foram: a previsão do fator de interceptação em um absorvedor considerando quatro funções matemáticas; a previsão da rampa de aquecimento e da temperatura máxima de um sistema e, por fim, o apontamento do Sol em modo de coordenadas equatoriais. No desenvolvimento do protótipo foram relevantes: a utilização da cromagem para o espelhamento de uma antena de satélite; a elaboração de um contrapeso para correção do deslocamento de eixo e a simplificação dos modelos de destiladores. Já no que tange à experimentação foram destaques: a elaboração de uma metodologia experimental para determinar o fator de interceptação; a comparação de produtividade entre dois concentradores solares do tipo disco e Lente de Fresnel; a otimização da produção considerando uma variação da carga mássica e da concentração de sal marinho.

Assim sendo, o capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica para o projeto e a construção de concentradores e evaporadores solares sendo dividido em cinco temas: energia solar, concentrador solar, destilação, evaporador solar e água. Em energia solar, há uma descrição das estruturas do Sol, das relações gravitacionais e geométricas com a Terra, dos princípios da radiação e do rastreamento solar. Na parte dos concentradores, há um destaque para os parâmetros de caracterização e também para os principais modelos de concentradores. Os assuntos seguintes, tratam da destilação e dos evaporadores solares. A água é o último tema abordado e referencia as propriedades físico-químicas dessa substância.

No capítulo 3, a metodologia para caracterização e aquisição dos resultados experimentais é descrita indicando a localização da unidade, os critérios de planejamento e construção dos equipamentos e a metodologia experimental adotada.

No capítulo 4 é apresentado os resultados e a discussão, o que foi detalhado pelas etapas de construção das unidades e pelas produtividades resultantes dos sistemas. Logo, o planejamento e a construção da unidade experimental traz informações referentes a definição da curvatura, a previsão da dinâmica de aquecimento e a elaboração do protótipo que discute as soluções tecnológicas implementadas. A segunda parte trata dos resultados experimentais descrevendo os parâmetros de caracterização dos concentradores, os experimentos envolvendo a dessalinização e o planejamento fatorial que investiga os efeitos

das variações da concentração de sal marinho e da carga mássica na solução. Por fim, as conclusões do trabalho são expostas no capítulo 5.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

Esse capítulo apresenta os fundamentos teóricos para a criação e o desenvolvimento de concentradores e evaporadores solares. É dividido em cinco temas: energia solar, concentrador solar, destilação, evaporador solar e água.

Em energia solar, há a descrição das estruturas do Sol, as relações gravitacionais e geométricas com a Terra, os princípios da radiação e do rastreamento solar. Na parte dos concentradores, há um destaque para os parâmetros de caracterização e os seus principais tipos, considerando exemplos atuais do desenvolvimento dessa tecnologia. O assunto seguinte, diz respeito ao processo de destilação no qual descreve o mecanismo de separação envolvido. Logo adiante, o tópico tratado é dos evaporadores solares, através de uma descrição histórica e do seu mecanismo de funcionamento, além da exposição dos principais modelos e de suas utilizações recentes. Nessa parte, é enfatizado o estado da arte de equipamentos híbridos entre os concentradores e evaporadores solares.

A água é o último tema abordado e referência as propriedades físico-químicas dessa substância, tais como a estrutura molecular, a densidade, a tensão superficial, as propriedades coligativas, a definição de água destilada e, por fim, a salinidade.

2.1 Energia Solar

2.1.1 A Estrutura do Sol

O Sol, segundo Butcher (2012), é classificado como uma estrela de tamanho médio com temperatura e brilho típicos de uma estrela anã. Sua superfície é rarefeita, com um diâmetro aparente de 1,4 milhões de quilômetros, cerca de 109 vezes o diâmetro da Terra, tem massa total de aproximadamente $1,989 \cdot 10^{30}$ kg. A estrutura do Sol é dividida em duas regiões: a interior e a exterior.

Na primeira região, três camadas são evidentes: o núcleo, a zona de radiação e a zona de convecção, ilustradas na Figura 2.1. Elas são invisíveis aos meios convencionais de observação, por isso, são investigadas pela propagação das ondas de pressão, ou Helio-Sismologia. Assunto esse parte de uma das missões da sonda espacial não tripulada SOHO (DOMINGO, 1997).

A região exterior, por ser visível, pode ser estudada usando uma matriz de detectores de radiação e telescópios. Destacam-se as áreas conhecidas como: Fotosfera, Cromosfera, Zona de Transição e, por fim, a Coroa. Cada uma delas será descrita a seguir.

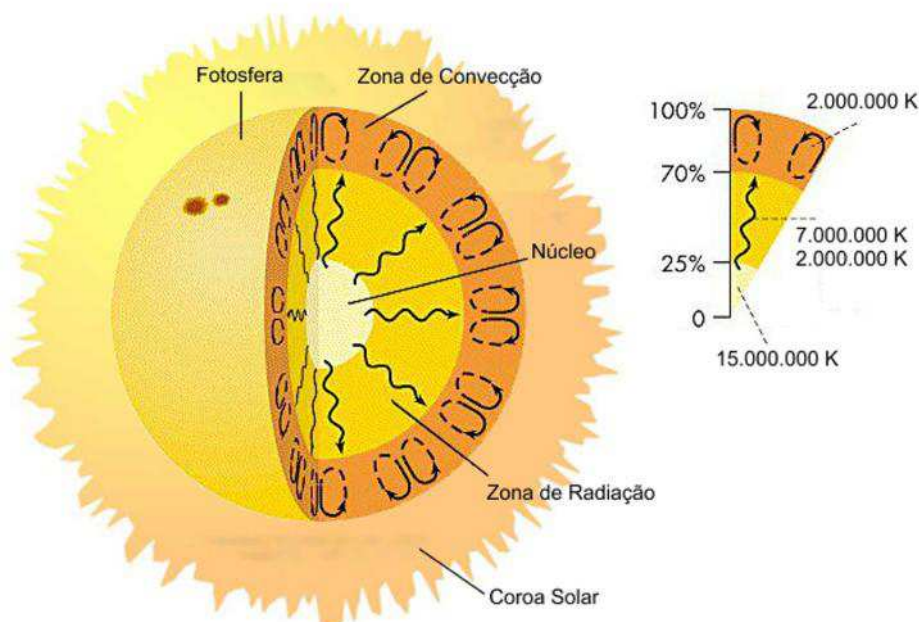
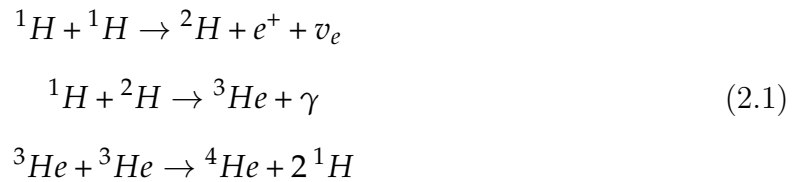


Figura 2.1: Estrutura interna do Sol, adaptado de Fix (2004).

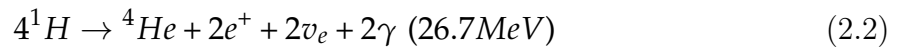
O Núcleo

O Núcleo é a fonte de toda a energia do Sol e está alocado desde o centro até aproximadamente 25% do raio de sua circunferência. Segundo Antia e Chitre (1995), a temperatura nessa região atinge mais de $15 \cdot 10^6$ K a uma alta densidade, cerca de 150 g.cm^{-3} , condições suficientes para forçar os átomos de hidrogênio a se fundirem.

Três etapas são necessárias para completar essa fusão nuclear, orienta Wallerstein *et al.* (1999), em uma cadeia de reações chamada próton-próton, ilustrado na Equação (2.2). Nessa reação, apenas 0,7% da massa é convertida em energia no formato de calor, luz visível e outras radiações.



Que podem ser simplificadas da seguinte forma:



Conforme calcula Sackmann *et al.* (1993), são necessários $7,00 \cdot 10^8$ t de hidrogênio para gerar $6,95 \cdot 10^8$ t de Hélio por segundo, a uma potência de $3,86 \cdot 10^{26}$ W. Espera-se que essa taxa de produção se mantenha por mais 5 bilhões de anos.

Zona de Radiação

A região que circunda o núcleo é conhecida como Zona de Radiação e está delimitada entre 25% a 70% de distância do centro do Sol (GARCIA *et al.*, 2007). Neste local, a temperatura diminui para cerca de $7 \cdot 10^6$ K a $2 \cdot 10^6$ K, preservando alguns átomos da desassociação. Esses átomos intactos têm a capacidade de absorver energia, armazená-la por algum tempo e depois emití-la como radiação. Deste modo, a energia gerada no núcleo é transmitida de um átomo para outro de maneira aleatória até sair dessa zona, processo esse que leva mais de 170 mil anos (BUTCHER, 2012).

Zona de Convecção

Fora da Zona de Radiação, em uma região definida entre 70% do raio do Sol até a superfície, o gradiente adiabático é suficiente para que a energia produzida no núcleo possa ser transportada por convecção, a temperatura nessa zona decresce para cerca de $2 \cdot 10^6$ K (THOMPSON, 1991). Assim, o material mais quente próximo à parte inferior da zona de convecção, tende a subir e ao atingir o topo dessa camada, sofre arrefecimento e lança-se ao fundo, iniciando o ciclo novamente. A energia de transferência na zona de convecção é muito mais rápida do que na zona de radiação, levando pouco mais de uma semana para atravessar essa camada.

Fotosfera

A observação do Sol registra uma área em que o gás começa a ficar tão denso que torna-se opaco, essa região é conhecida como Fotosfera, ou superfície aparente do Sol, sendo o disco visível dessa estrela. A contínua ascensão e queda de bolhas quentes e frias da zona de convecção, produz um padrão de granulação na superfície. A temperatura dessa área é de cerca de 5773 K, seu espectro equipara-se à de um corpo negro (MCFADDEN *et al.*, 2007).

É possível observar também nessa superfície aparente, pontos negros conhecidos como manchas solares. Eles são mais frios do que o gás circundante e por isso mais escuros. Uma mancha solar típica tem uma temperatura de cerca de 3500 K sendo dividida em duas partes, a parte interna, muito escura conhecida como Umbra e a região circundante, conhecida como Penumbra (TLATOV *et al.*, 2014). O tempo de vida das manchas solares é variável e se estende desde uma hora a até meses. Sua quantidade aumenta e diminui em um padrão regular ao longo do ciclo do Sol, tendo um ponto de máximo a cada 11 anos.

Cromosfera

Acima da Fotosfera existe uma camada de gás com cerca de 2000 km de espessura, conhecida como Cromosfera onde a energia continua a ser transportada por radiação. Os átomos de hidrogênio absorvem a energia da Fotosfera e a maior parte da energia é emitida como luz vermelha. Nesta área, também há padrões de células convectivas semelhantes às da Fotosfera, mas em uma escala muito maior, sendo conhecida como super-granulação (MEI; HONG-QI, 2001). Outra característica interessante da Cromosfera é a presença de espículas solares, que são jatos supersônicos de plasma ou gás que podem alcançar milhares de quilômetros (PONTIEU *et al.*, 2004).

Zona de Transição

Logo acima da Cromosfera, em uma camada com cerca de 200 km de espessura, a temperatura sobe drasticamente de 20000 K, para mais de $1,0 \cdot 10^6$ K na Coroa (ERDÉLYI.; BALLAI, 2007). Esta região é denominada Zona de Transição.

Coroa

A camada mais externa do Sol é chamada de Coroa e se estende por milhares de quilômetros ao longo do espaço podendo, inclusive, atingir a órbita da Terra. Tem um formato determinado principalmente pelo campo magnético, podendo ser observado durante um eclipse solar total ou utilizando um telescópio com coronógrafo, que simula um eclipse.

A Coroa Solar emite continuamente partículas carregadas, fenômeno conhecido como vento solar. Valores típicos de densidade, vazão e temperatura do vento solar são 8 prótons por centímetro cúbico, 440 km.s^{-1} e $1,2 \cdot 10^5$ K, respectivamente (MCFADDEN *et al.*, 2007).

Há ainda uma outra manifestação conhecida como Fulguração Solar ou Ejeções de Massa Coronal (EMC), caracterizada por explosões violentas e abruptas, acompanhadas por liberação de gás, elétrons, luz visível, raios Ultravioleta e raios-X (WEBB; HOWARD, 1994). Esses elementos ionizam a atmosfera e impedem o movimento das ondas de rádio causando interferência em comunicações, sistemas de navegação, satélites e até levar a oscilações nas redes elétricas.

2.1.2 Relações entre o Sol e a Terra

O volume do Sol é aproximadamente 1 milhão de vezes maior do que a Terra, o que gera uma atração gravitacional em seu sentido. Assim sendo, a Terra orbita o Sol realizando dois movimentos principais, a Rotação e a Translação. Essas movimentações, aliadas a inclinação do eixo terrestre, são responsáveis por fenômenos conhecidos como Solstícios e Equinócios. A partir desses movimentos, observando pela Terra, tem-se um deslocamento aparente do Sol, que segue aproximadamente o sentido Leste-Oeste. Matematicamente ele pode ser previsto utilizando um meio de coordenadas e a aplicação da geometria angular, assuntos estes que também serão descritos a seguir.

Rotação e Translação

A Terra tem dois movimentos principais: a Rotação e a Translação. A Rotação é o movimento do planeta ao redor do seu eixo, o qual dura 24 h (dia solar médio), a uma velocidade de 467 m.s^{-1} , mensurado pela Linha do Equador. Seu sentido é de Oeste para Leste, conforme ilustrado na Figura 2.2. Ela é responsável pelo deslocamento aparente do Sol e pelos ciclos entre o dia e a noite. Logo, a qualquer momento, metade da Terra está iluminada e a outra está na escuridão. Dessa maneira, a linha que divide essas duas referências é conhecida como Círculo de Iluminação.

O outro movimento é o da Translação, também ilustrado na Figura 2.2. Pode ser definido como o deslocamento da órbita da Terra ao redor do Sol. Este movimento é elíptico o que faz com que a distância entre eles varie durante o ano de $147,3 \cdot 10^6 \text{ km}$, no Periélio ($\cong 3$ Janeiro) até $152,1 \cdot 10^6 \text{ km}$, no Afélio ($\cong 4$ Junho). A distância média anual é de $149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$ ou uma unidade astronômica (AU), esta referência serve de escala para mensurar as distâncias ao longo do cosmos.

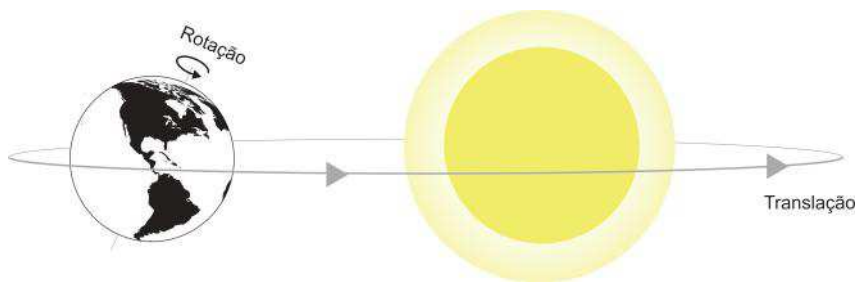


Figura 2.2: Movimento de rotação e translação da Terra.

Plano da Eclíptica (Elíptica)

O plano da eclíptica, ou elíptica, é a superfície bidimensional e plana, que cruza a órbita da Terra ao redor do Sol. Neste plano, atualmente, o eixo da Terra é inclinado $23,45^\circ$ a partir da perpendicular, conforme ilustrado na Figura 2.3.

Essa inclinação é fixa durante toda a órbita da Terra ao redor do Sol, o que faz com que haja mudanças na intensidade e na duração da luz do dia. Circunstância essa, responsável pelas estações do ano e pelas alterações na altura solar.

Solstícios

Refere-se ao instante do ano em que a duração do dia e da noite tem uma desigualdade máxima comparando os Hemisférios Norte e Sul. Isso acontece, quando a projeção do

eixo da Terra, sobre o Plano da Elíptica, coincide com a reta que liga os centros da Terra e do Sol. O ângulo entre os raios do Sol e o plano do equador é máximo, atingindo $23,45^\circ$ (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Esta situação ocorre duas vezes por ano nos dias solsticiais. Assim, a declinação é $+23,45^\circ$ no Solstício de Junho (Inverno do Hemisfério Sul) e $-23,45^\circ$ no Solstício de Dezembro (Verão do hemisfério Sul). Nesses dias o Sol estará, respectivamente, sobre o Trópico de Câncer e o Trópico de Capricórnio.

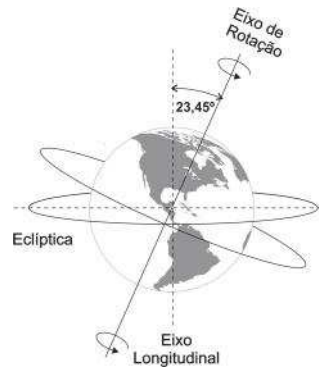


Figura 2.3: Representação do plano da eclíptica.

Equinócios

Refere-se ao momento do ano em que a duração do dia é igual à da noite em toda a Terra. Isso ocorre quando a projeção do eixo da Terra, sobre o Plano da Eclíptica, é perpendicular à reta que une os centros da Terra e do Sol, ilustrado pela Figura 2.4. Nos dias equinociais (Março e Setembro), a declinação do Sol é de 0° , atingindo o zênite sobre a Linha do Equador.

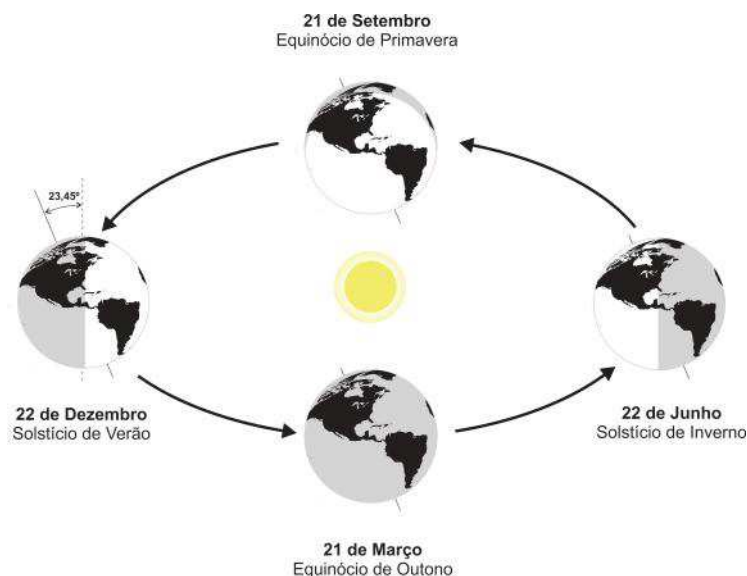


Figura 2.4: Representação dos solstícios e equinócios.

Orientação de Astros Celestes

A posição do Sol, em relação a um determinado ponto da Terra, é feita através de um sistema de coordenadas. Segundo Horvath (2008), os conceitos a seguir, ilustrados na Figura 2.5, são fundamentais para essa orientação.

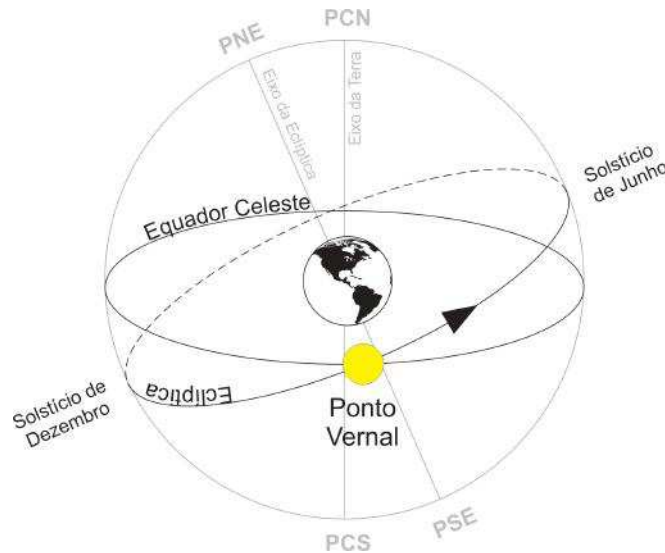


Figura 2.5: Referenciais para orientação celeste.

- Esfera Celeste (EC): esfera imaginária com centro na Terra e raio indefinido. O Sol viaja pela Esfera Celeste aproximadamente de Leste para Oeste deixando um rastro conhecido como Caminho do Sol. Essa trajetória, varia conforme a hora, o dia do ano e a latitude (KREIDER; KREITH, 1981).
- Equador Celeste: projeção da Linha do Equador da Terra na EC.
- Ponto Vernal (γ_{pv}): ponto da EC determinado pela posição do Sol quando esse, movendo-se pelo plano da eclíptica, cruza o Equador Celeste. Acontece aproximadamente no dia 21 de Março determinando o Equinócio de Outono para o Hemisfério Sul.
- Horizonte Celeste: plano horizontal do observador.
- Polo Norte Celestial (PNC): ponto coincidente entre o prolongamento do eixo de Rotação da Terra, no Hemisfério Norte, e a EC.
- Polo Sul Celestial (PSC): ponto coincidente entre o prolongamento do eixo de Rotação da Terra, no Hemisfério Sul, e a EC.
- Hemisfério Norte Celeste: projeção do Polo Norte terrestre sobre a EC.
- Hemisfério Sul Celeste: projeção do Polo Sul terrestre sobre a EC.

Geometria Angular

Considerando uma superfície plana, em qualquer lugar da Terra, pode-se definir os seguintes ângulos entre essa superfície e o Sol, ilustrado na Figura 2.6.

- Ângulo Zenital (θ_z): ângulo formado entre o zênite e a linha de incidência do Sol. Variável conforme a latitude, horário e época do ano.
- Ângulo da Altura Solar (φ_s): desvio entre o plano horizontal e a linha de incidência do Sol. É complementar ao ângulo zenital.
- Azimute de Superfície (γ_{sn}): ângulo formado entre o Norte (Hemisfério Sul) e a projeção da normal à superfície no plano.
- Azimute Solar (γ_s): ângulo formado entre o Norte (Hemisfério Sul) e a projeção da radiação direta no plano.
- Inclinação da superfície (β): ângulo entre a horizontal e o plano da superfície ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$).
- Ângulo de Incidência (θ): ângulo entre a normal à superfície inclinada e a radiação direta.
- Ângulo Horário (ω): deslocamento angular do sol para leste ou oeste do meridiano local, que devido à Rotação da terra no seu eixo é 15° por hora. De manhã é negativo e à tarde é positivo.

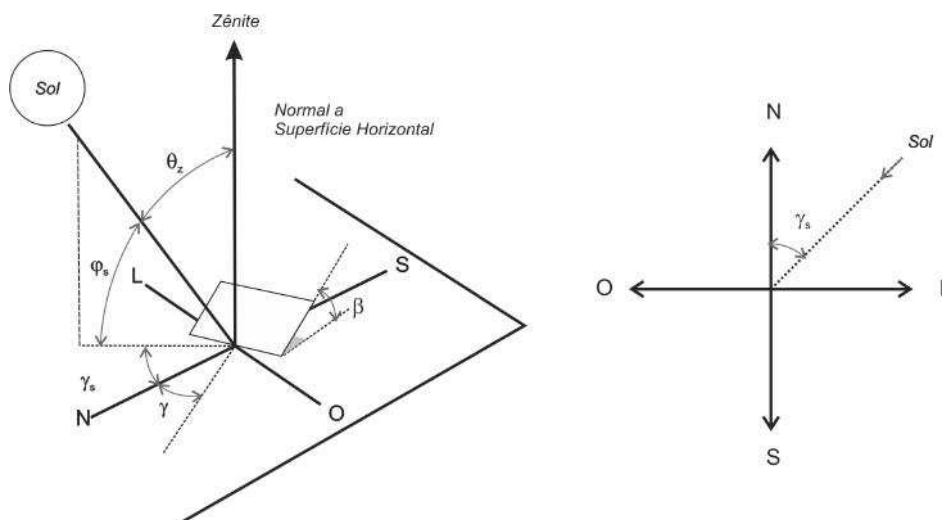


Figura 2.6: Ângulos entre uma superfície plana e a posição do Sol, adaptado de Duffie e Beckman (2013).

Coordenadas Geográficas

A determinação da posição de um ponto qualquer no mapeamento da Terra depende de duas das três coordenadas existentes em um sistema esférico de coordenadas, com base no eixo de Rotação do planeta. Nas coordenadas geográficas, linhas horizontais chamadas paralelos e linhas perpendiculares à essas, denominadas meridianos, são igualmente espaçadas e fundamentam dois ângulos: a Longitude e a Latitude.

Segundo Filho e Saraiva (2004), a Longitude (λ) é o ângulo medido ao longo do plano do Equador da Terra, iniciando pelo Meridiano de Greenwich e se estendendo até o meridiano examinado, conforme ilustrado na Figura 2.7. Varia de 0° até $+180^\circ$ a Leste de Greenwich e de 0° até -180° a Oeste. Cada 15° corresponde a uma hora.

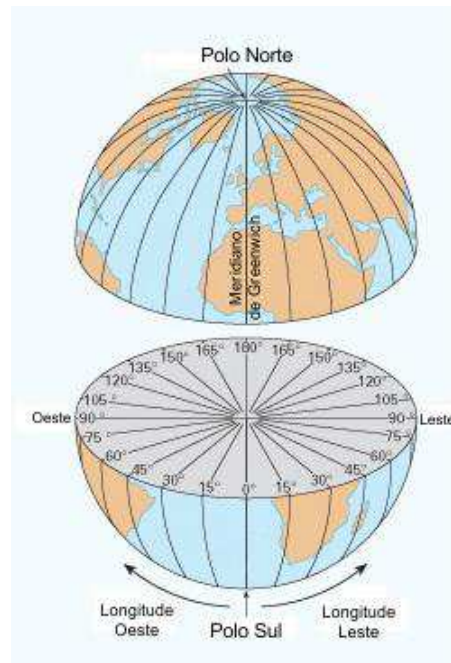


Figura 2.7: Ângulos da longitude, adaptado de Stoll (2014).

De forma perpendicular, a Latitude (ϕ) é medida ao longo do meridiano local, com origem no equador e extremidade no lugar examinado. Tem amplitude de -90° a $+90^\circ$, conforme ilustrado na Figura 2.8. Valores negativos referem-se ao Hemisfério Sul e valores positivos ao Hemisfério Norte.

Coordenadas Horizontais ou Alto-Azimutais

O sistema Horizontal ou Alto-Azimutal utiliza como base o Horizonte Celeste tendo como coordenadas a Altura e o Azimute. Segundo Horvath (2008), o Azimute é o arco medido sobre o horizonte iniciando-se no Norte geográfico e se estendendo, no sentido horário até a projeção do astro no mesmo plano. Tem variação de 0° até 360° .

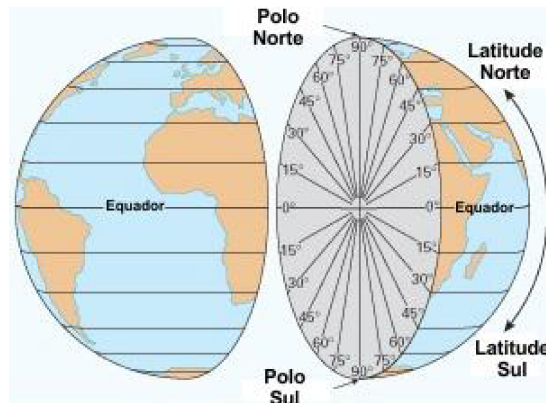


Figura 2.8: Ângulos da latitude, adaptado de Stoll (2014).

A Altitude é o arco vertical do astro, com origem no horizonte e extremidade no astro estudado, conforme ilustrado na Figura 2.9. Análogo à Latitude, do sistema de coordenadas geográficas, varia entre -90° até $+90^\circ$. Valores negativos referem-se ao Hemisfério Sul e valores positivos ao Hemisfério Norte.

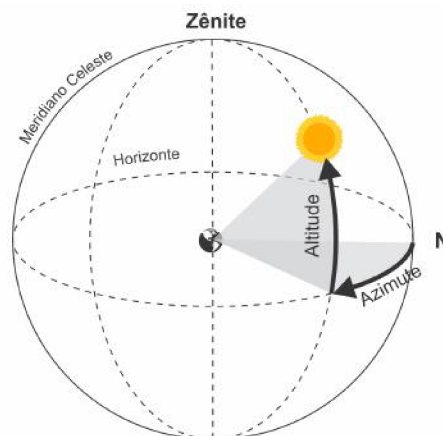


Figura 2.9: Coordenadas alto-azimutais, adaptado de (FILHO; SARAIVA, 2004).

Coordenadas Equatoriais

O plano fundamental do Sistema Equatorial é o Equador Celeste, suas coordenadas são a Ascensão Reta e a Declinação, ilustrados na Figura 2.10. Conforme cita Filho e Saraiva (2004), a Ascensão Reta (α ou AR) é o arco mensurado sobre o plano do Equador Celeste, com origem no Ponto Vernal, e extremidade no meridiano do astro estudado. Sua faixa de variação está entre 0 h e 24 h ou 0° e 360° , com sentido anti-horário quando vista pelo Norte.

A Declinação (δ ou DEC) é o arco medido sobre o meridiano perpendicular ao equador, com origem no próprio equador e extremidade no astro examinado. Varia entre -90° e $+90^\circ$. Como a excentricidade da órbita da terra é muito pequena, ela pode ser aproximada

a um círculo e seu cálculo, para qualquer dia do ano, é dado pela Equação (2.3), em graus, elaborada por Cooper (1969).

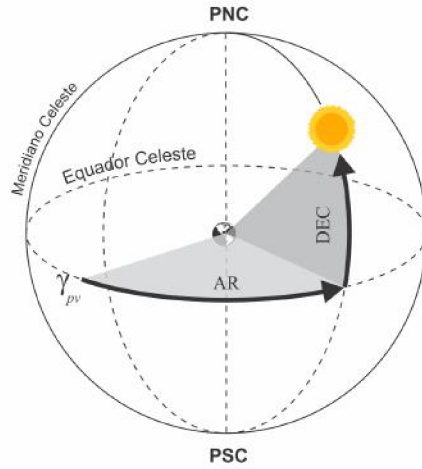


Figura 2.10: Coordenadas equatoriais, adaptado de Filho e Saraiva (2004).

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.3)$$

Altura Solar Máxima (α_{s-md})

Os movimentos da Terra e a inclinação do seu eixo faz com que a altura solar sofra variações durante o ano. A altura solar máxima é de 90° , quando o Sol encontra-se ao meio-dia solar. No entanto, esse valor sofre redução de acordo com a Latitude (ϕ) e a Declinação (δ), conforme a Equação (2.4).

$$\alpha_{s-md} = 90 - (|\phi| + |\delta|) \quad (2.4)$$

Horário Sideral

Tem como referência de tempo, o movimento aparente das estrelas, consequência do movimento de Rotação da Terra. Seu dia tem duração anual média de 23 horas, 56 minutos e 4 segundos.

Horário Solar (T_s)

Se baseia na duração do movimento aparente do sol através do céu, sendo o meio-dia solar o instante em que o sol cruza o meridiano do observador. Nele, os dias têm 24

horas, consequência da soma dos movimentos de Rotação e do movimento de Translação (acrécimo de 3 minutos e 56 segundos em relação ao sidereal).

Esse é o tempo usado nas correlações angulares do Sol e não coincide com o Horário Civil (T_c). Todavia, pode ser convertido corrigindo duas variáveis. A primeira delas é a diferença, em minutos, entre as longitudes exata do observador (λ_{loc}) com o meridiano referência de fuso horário onde ele está (λ_{st}), conforme a Equação (2.5).

$$T_s = T_c + 4 (\lambda_{st} - \lambda_{loc}) + E \quad (2.5)$$

A outra correção, vem da Equação do Tempo (E), simplificada pela Equação (2.6), também em minutos, que considera as perturbações na taxa de Rotação da Terra (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$E = 9,87 \text{ sen } 2B - 7,53 \text{ cos } B + 1,5 \text{ sen } B \quad (2.6)$$

Em que B pode ser calculado pela Equação (2.7), utilizando n , como número do dia do ano, dado pela Tabela 2.1.

$$B = \frac{360(n - 81)}{364} \quad (2.7)$$

Tabela 2.1: Dia médio do mês e valores de n , adaptado de Klein (1977).

Mês	Dia do Mês (i)	Data	n
Janeiro	i	17	17
Fevereiro	31+i	16	47
Março	59+i	16	75
Abril	90+i	15	105
Maio	120+i	15	135
Junho	151+i	11	162
Julho	181+i	17	198
Agosto	212+i	16	228
Setembro	243+i	15	258
Outubro	273+i	15	288
Novembro	304+i	14	318
Dezembro	334+i	10	344

2.1.3 Radiação Solar

A radiação solar é a energia radiante emitida pelo Sol, derivada principalmente da radiação electromagnética. É a principal fonte energética da vida na Terra, sendo responsável pelo dinamismo da atmosfera e pelas características climáticas terrestres (HILLS *et al.*, 2013).

De toda a radiação incidida sobre o planeta cerca de 30% é refletida para o espaço, 20% é absorvida por nuvens e moléculas do ar. Conquanto, segundo Chen (2011), meros 0,01% são suficientes para atender a necessidade da população da Terra, mesmo com as projeções crescentes da demanda energética do mundo, ilustradas na Figura 2.11, o que salienta a importância desse meio energético.

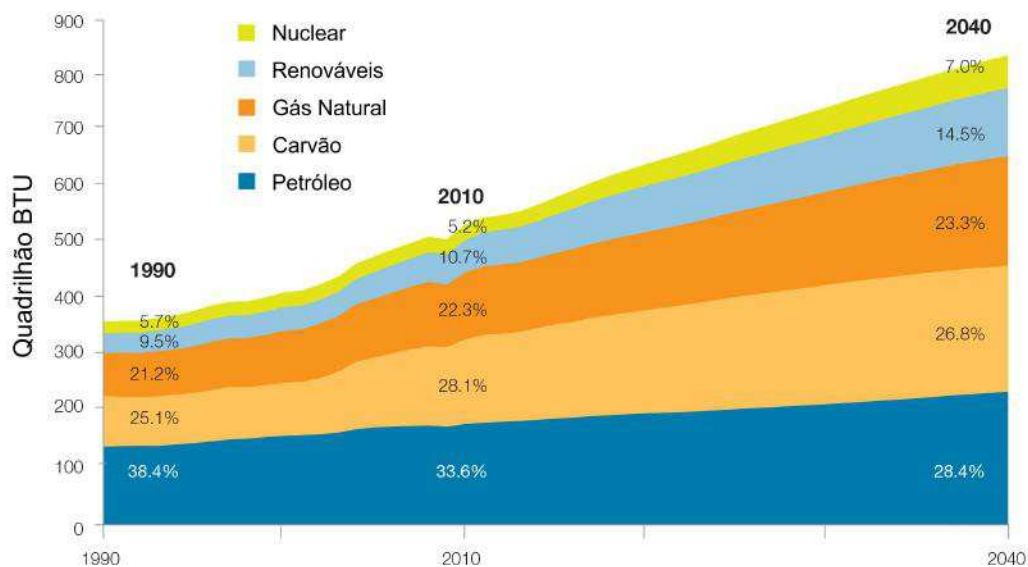


Figura 2.11: Projeção da demanda energética do mundo, adaptado de EIA (2014).

A energia solar difere da maioria dos sistemas energéticos por um importante aspecto: a dificuldade de controle. Não é possível, por exemplo, acrescentar uma determinada quantidade de energia solar em um coletor. Por isso, Daniels (1980) defendeu a importância do estudo do comportamento do Sol possibilitando, ao menos, a previsão da intensidade e dos melhores meios de coletá-la.

Segundo Kreider e Kreith (1981) há pelo menos 7 fatores principais que afetam a quantidade de incidência da radiação solar em um coletor, são eles:

- **Localização geográfica:** a eficiência do coletor solar é prejudicada quando predo-

mina na região o clima chuvoso ou nublado.

- **Posição do coletor:** árvores e construções podem provocar sombras no coletor diminuindo a captação de energia.
- **Orientação do coletor:** os coletores que acompanham a posição do Sol, mantendo os raios solares sempre na perpendicular, tiram o proveito máximo da captação. O que não ocorre com os coletores fixos, que devem considerar como variáveis, as estações do ano e a latitude da instalação (DUFFIE; BECKMAN, 2013).
- **Comprimento do dia:** quanto mais horas de luminosidade solar, maior é a eficiência.
- **Estações do ano:** na maioria dos locais, o verão possibilita dias com maior tempo de insolação, aumentando a eficiência do coletor.
- **Condições atmosféricas:** as nuvens são capazes de reduzir a incidência da radiação em até 90%. Ela pode ainda ser afetada pela umidade, presença de partículas de sujeira, poluição, etc.
- **Concepção do coletor:** o formato do coletor, sua inclinação, seu sentido, seu isolamento, resultam em diferentes níveis de eficiências.

Espectro da Luz

A energia radiante é usualmente descrita a partir das partículas de fótons, viajando em ondas transversais, na velocidade da luz. Cada fóton possui um comprimento de onda λ_o gerando uma quantidade de energia E_r . Esses são relacionados pela Equação (2.8):

$$E_r = \frac{k_p c}{\lambda_o} \quad (2.8)$$

Em que k_p é a constante de Planck, igual a $6,6 \cdot 10^{-34}$ J.s, e c é a velocidade da luz no vácuo, igual a $3 \cdot 10^8$ m/s. A frequência v da radiação é dada pelo comprimento de onda λ_o :

$$v = \frac{c}{\lambda_o} \quad (2.9)$$

Logo a Equação (2.8) se transforma em:

$$E_r = k_p v \quad (2.10)$$

Alguns nomes foram padronizados conforme o comprimento de onda e são expressos de acordo com o espectro de luz ilustrado pela Figura 2.12.

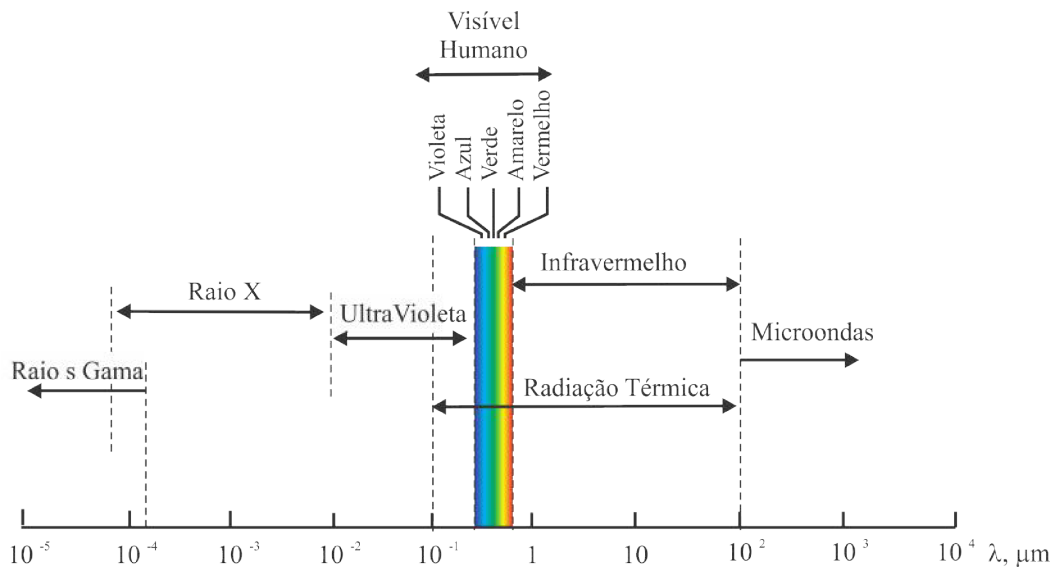


Figura 2.12: Espectro de ondas eletromagnéticas, adaptado de Çengel e Ghajar (2011).

Segundo Bezerra (1998), a radiação eletromagnética vinda do sol, é distribuída em 3% de raios Ultravioleta, 42% de luz visível e 55% de raios Infravermelho. Sendo que a radiação térmica abrange a faixa de $10^{-1}\mu\text{m}$ até $10^2\mu\text{m}$ o que corresponde a: parte das ondas ultravioletas, todo o espectro das ondas visíveis aos olhos humanos e a toda faixa das ondas Infravermelha.

Constante Solar

É o fluxo de energia solar que atinge a terra, por unidade de tempo, recebida em uma área de superfície perpendicular a direção de propagação da radiação. Sua medição é realizada fora da atmosfera terrestre e varia conforme a distância entre o Sol e a Terra. As nuvens e a absorção atmosférica são alguns dos fatores que interferem nas medições da constante, quando feita na superfície da Terra. Por isso, a instrumentação é situada no espaço, mesmo assim, outros fatores como as manchas solares podem interferir nessa análise. Conforme Duffie e Beckman (2013), a Constante Solar inclui todos os comprimentos de onda da radiação solar, e não apenas a luz visível. Em média pode ser considerada 1366 W.m^{-2} , mas varia entre 1412 W.m^{-2} no início de janeiro até 1321 W.m^{-2} no início de julho.

Terminologia

Para entender o comportamento da radiação solar na Terra, faz-se necessário o conhecimento das seguintes definições, citadas por Kalogirou (2009).

- Zênite: linha imaginária que liga o centro da Terra a um ponto na superfície, prolongando-se até o espaço acima do observador.
- Nadir: linha imaginária oposta ao Zênite.
- Massa de Ar (m): é a relação entre a espessura óptica da atmosfera que a radiação passa, com a espessura óptica caso o Sol estivesse no zênite. A massa de ar quantifica a redução do poder da luz que passa através da atmosfera sendo absorvido pelo ar, poluição, etc.
- Radiação Direta ou de Feixe: radiação solar não dispersa pela atmosfera.
- Radiação Difusa: radiação solar que sofre dispersão pela atmosfera.
- Radiação Total: é o resultado da soma entre a radiação direta e a difusa em uma superfície horizontal (mais comum) ou inclinada.
- Irradiância (G): fluxo de energia eletromagnética incidente em uma superfície (W/m^2) por unidade de área da superfície.
- Irradiação ou Exposição Radiante: fluxo de energia eletromagnética incidente em um determinado período de tempo ($\text{J}.\text{m}^{-2}$). Pode ser expressa por I se utilizar o tempo de medição de uma hora ou H para a insolação de um dia (ou outro tempo especificado).
- Radiosidade: fluxo de energia radiante que deixa uma superfície ($\text{W}.\text{m}^{-2}$). Combina emissão, reflexão e transmissão.
- Poder Emissivo: representa a fração de energia incidente que deixa a superfície por unidade de área exclusivamente por emissão ($\text{W}.\text{m}^{-2}$).

Os símbolos G , I e H podem vir acompanhados dos subscritos o , referenciando a irradiação acima da atmosfera, ou seja, a irradiação extraterrestre, b e d referindo a irradiação direta e difusa respectivamente, T a irradiação em um plano inclinado e n (ou sem nenhum subscrito) a irradiação em um plano normal a direção de propagação.

Os equacionamentos envolvendo a irradiação solar extraterrestre, a irradiação em superfícies inclinadas, os índices de claridade, a duração do dia, o horário do nascer e do pôr do sol, o ângulo de incidência em superfícies fixas e em movimento podem ser visualizados no Apêndice B.

2.2 Concentrador Solar

Concentradores solares são equipamentos que aumentam a quantidade de energia solar incidida sobre um absorvedor (também conhecido como receptor) através da convergência dos raios solares originando os seguintes tipos de foco: de região, linear e pontual. Para isso, utilizando-se de superfícies reflexivas ou refrativas, podendo essas serem fixas ou móveis (GHOSH; PRELAS, 2011).

Sua eficiência está principalmente vinculada à precisão óptica do equipamento coletor, às condições de isolamento térmico da parte absorvedora e às condições climáticas do local de instalação, como vento, nuvens, chuva e níveis de incidência de radiação solar. Esta última, pode ser estimada através de ferramentas matemáticas e estatísticas tal como o modelo de Angström-Prescott, descrita por Almorox *et al.* (2008), ou medida, conforme cita Palz (2002), por piranômetros, heliógrafos e piro-neliômetros.

Segundo Garg e Prakash (2000), os concentradores solares têm como principais vantagens: a possibilidade de atingir altas escalas de temperatura, resultando em uma eficiência termodinâmica melhor, a redução de perdas devido a uma área de aquecimento menor e a redução de custos de material de construção.

2.2.1 Parâmetros de Caracterização

Os parâmetros mais comuns para caracterização de concentradores solares são: a área de abertura, o ângulo limite, o ângulo de borda, a área de absorção, o índice de concentração, o fator de intercepção, a eficiência óptica e a eficiência térmica instantânea (GARG; PRAKASH, 2000).

Área de Abertura (A_a)

É a área plana do concentrador à qual a irradiação solar incide. A Figura 2.13 traz como exemplo um concentrador solar cilíndrico, também conhecido como concentrador solar de calha. A região em cinza claro representa a Área de Abertura.

Ângulo Limite (θ_{lim})

É o ângulo máximo, à partir do ângulo normal a superfície, no qual a luz solar pode ser capturada pelo absorvedor. A maximização do ângulo limite dos concentradores é desejável principalmente quando se trabalha com sistemas sem rastreamento contínuo.

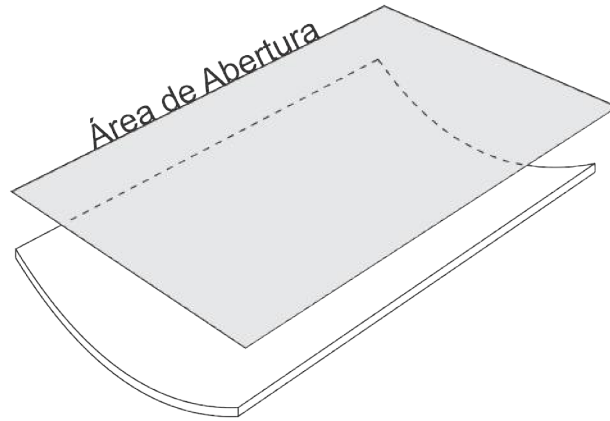


Figura 2.13: Ilustração da área de abertura.

Dessa maneira, a Figura 2.14 ilustra esse conceito. Nesta imagem, o ângulo de incidência dos raios solares (θ) é apresentado em três situações angulares quando: menor que o ângulo limite ($\theta < \theta_{lim}$), igual ao ângulo limite ($\theta = \theta_{lim}$) e maior que o ângulo limite ($\theta > \theta_{lim}$).

Nesse último caso, o absorvedor passa a não ser mais atingido. Logo, para um concentrador e um absorvedor simétricos, o ângulo limite é igual a θ_{lim} e o ângulo limite total, considerando os dois lados da simetria, é igual a $2 \theta_{lim}$.

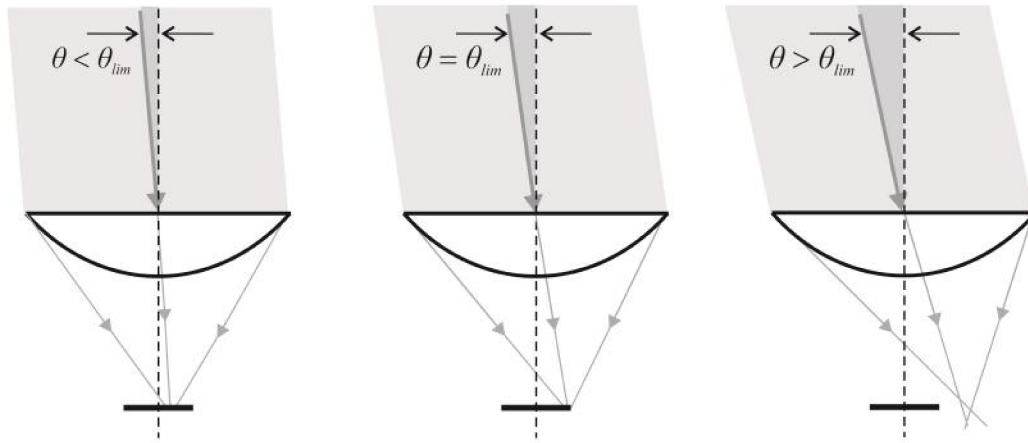


Figura 2.14: Referência para o ângulo limite em concentradores solares.

Sem embargo, segundo Lovegrove e Stein (2012), as imperfeições oriundas da imprecisão de rastreamento, da manufatura óptica, dos ajustes dos componentes, da movimentação do sistema pelo vento, da baixa rigidez da estrutura do suporte, das deformações temporais e das diferenças de diâmetro entre o Sol e a Terra, são alguns dos motivos que sugerem uma tolerância ao caracterizar o ângulo limite para sistemas não ideais, conforme ilustrado na Figura 2.15.

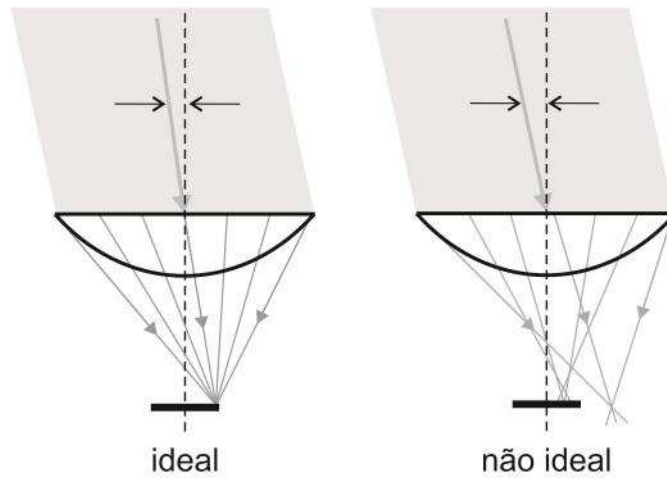


Figura 2.15: Ângulo limite em um sistema ideal e em sistemas não ideais.

Ângulo de borda (φ_r)

É o ângulo formado entre o segmento de reta que liga o centro do absorvedor com o ponto mais extremo da parábola e o segmento que liga o centro do absorvedor com o centro da parábola, conforme ilustração da Figura 2.16. Pode ser encontrado através da Equação (2.11) (FOSTER *et al.*, 2009).

$$\operatorname{tg} \varphi_r = \frac{1}{\left(\frac{d_h}{8d_v}\right) - \left(\frac{2d_v}{d_h}\right)} \quad (2.11)$$

Em que d_h é a distância horizontal entre as extremidades da parábola e d_v é a distância vertical, paralela ao eixo de revolução da curvatura, entre o centro da curvatura e a extremidade.

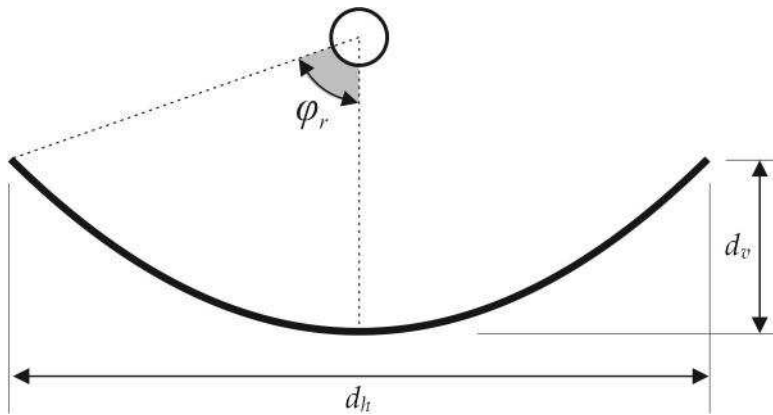


Figura 2.16: Ângulo de borda de uma parábola.

Índice de Concentração (C)

O índice de concentração, taxa de concentração geométrica ou simplesmente taxa de concentração, é definido como a razão entre a área de abertura do coletor solar (A_a) e a área do absorvedor (A_{abs}) que recebe a radiação concentrada. A Equação (2.12) apresenta essa razão. As formas de calcular o índice de concentração máximo é apresentado no Apêndice B. Um índice de concentração entre 2 e 10 é considerado baixo, entre 10 e 100 médio e acima de 100 alto (LEUTZ; SUZUKI, 2001).

$$C = \frac{A_a}{A_{abs}} \quad (2.12)$$

Fator de Intercepção (γ_i)

A perda óptica pode ser expressa pelo fator de intercepção, sendo definido como a razão entre a radiação solar direcionada para o absorvedor e a radiação solar total refletida. Para uma imagem arbitrária como na Figura 2.17, a área abaixo da curva é a energia total refletida para o absorvedor. Se o absorvedor plano ocupa o comprimento de A a B , a área hachurada representará a energia interceptada. Portanto, a definição de γ_i é escrita através da Equação (2.13). Em que w é o comprimento mensurado à partir do centro do absorvedor até a sua extremidade (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

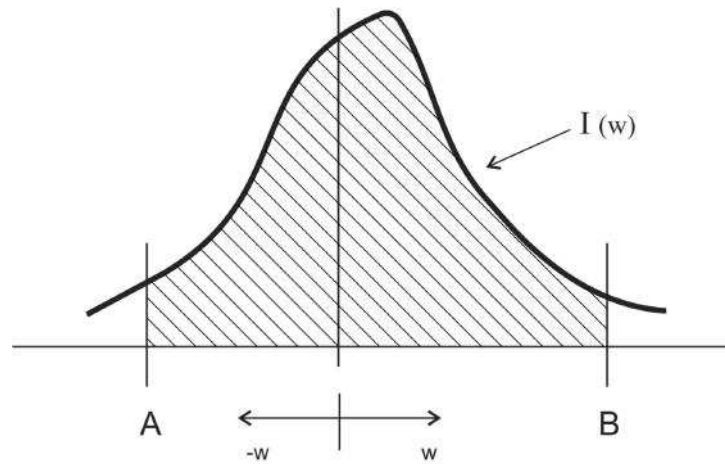


Figura 2.17: Radiação interceptada por um absorvedor, adaptado de Duffie e Beckman (2013).

$$\gamma_i = \frac{\int_A^B I(w) dw}{\int_{-\infty}^{\infty} I(w) dw} \quad (2.13)$$

Eficiência Óptica (η_o)

É a razão de energia absorvida pelo absorvedor com à energia incidente na abertura do concentrador. Inclui perdas devido à superfície da lente ou do espelho, formas, sombras, reflexo, transmissividade, absortividade e precisão de rastreamento (WINSTON *et al.*, 2005).

$$\eta_o = \rho_p \tau_v \alpha_{abs} \gamma_i [(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta)] \quad (2.14)$$

Em que, ρ_p é a refletividade do material refletor, τ_v é a transmissividade do material de cobertura do absorvedor, caso exista uma, α_{abs} é absortividade do absorvedor, γ_i é o fator de intercepção, θ é o ângulo de incidência dos raios solares e A_f é o fator geométrico de sombreamento.

Quando o sistema é rastreado em dois eixos o ângulo de incidência dos raios solares (θ) é sempre igual a 0. Assim, a equação da eficiência óptica pode ser reduzida para a Equação (2.15).

$$\eta_o = \rho_p \tau_v \alpha_{abs} \gamma_i \quad (2.15)$$

Eficiência Térmica Instantânea (η)

A eficiência térmica de um concentrador é definida como a razão entre a energia útil fornecida pelo concentrador e a energia incidente na abertura, composta em termos de radiação direta e difusa.

Contudo, a maioria dos concentradores utilizam somente a radiação direta (GARG; PRAKASH, 2000). Para calcular a eficiência termal instantânea (η) de um concentrador solar faz-se um balanço energético no absorvedor. A energia térmica útil (q_u) fornecida por ele é dada pela equação (2.16).

$$q_u = \eta_o I_b A_a - U_l (T_{abs} - T_\infty) A_{abs} \quad (2.16)$$

Logo, a eficiência térmica instantânea pode ser escrita pela Equação (2.17).

$$\eta = \frac{q_u}{I_b A_a} = \eta_o - \frac{U_l (T_{abs} - T_\infty) A_{abs}}{I_b C} \quad (2.17)$$

Segundo Sukhatme e Nayak (2008), em temperaturas de funcionamento mais elevadas

as perdas por radiação sobrepõem as perdas por convecção e o balanço de energia pode ser simplificado conforme a Equação (2.18)

$$\eta = \frac{q_u}{I_b A_a} = \eta_o - \frac{U_l (T_{abs}^4 - T_\infty^4) A_{abs}}{I_b C} \quad (2.18)$$

Os termos U_l , T_{abs} , T_∞ e C são respectivamente o coeficiente de perda, a temperatura do absorvedor, a temperatura ambiente e o índice de concentração.

2.2.2 Tipos de Concentradores

A escolha de um tipo de concentrador basicamente segue as características de rastreadibilidade, índice de concentração, formato do absorvedor e temperatura requerida. Os mais comuns são: o concentrador plano, o concentrador solar composto, o tipo calha parabólica (cilíndrico), o tipo bacia parabólica (disco), a torre solar e as lentes do tipo Fresnel.

Concentrador Plano

Trata-se de um ou mais espelhos planos que direcionam os raios solares para o absorvedor, conforme Figura 2.18. Esses espelhos podem ser fixos ou ajustáveis. Por se tratar de um modelo simples, sua taxa de concentração é baixa, menor do que 4, porém, quando comparado com um modelo plano sem espelho, tem em ganho de temperatura do fluido de 20 °C a 30 °C (SUKHATME; NAYAK, 2008).

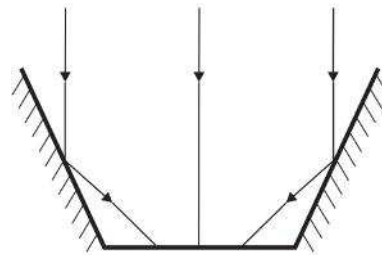


Figura 2.18: Concentrador solar plano, adaptado de Garg e Prakash (2000).

Chong *et al.* (2012) caracterizaram um concentrador plano em V para aquecimento de água. O índice de concentração foi de 1,8 vezes, considerando uma área de abertura de 1,35 m². A eficiência óptica encontrada foi de 70,54% atingindo uma temperatura de 85,9°C.

Farooqui (2013) fez um forno solar à partir de um concentrador plano. Acoplado a ele, foi desenvolvido um mecanismo de rastreamento solar de baixo custo utilizando a gravidade e molas. A proposta de funcionamento desse sistema foi de 6 horas.

Sethi *et al.* (2014) utilizaram um fogão solar com espelhos planos para estudar os efeitos de inclinação e formato de uma panela absorvedora de calor. Foi proposto um modelo no formato de um paralelepípedo ao invés do tradicional. Houve um ganho de 40% de eficiência e uma redução no tempo de ebulição de 37%.

KÜnnemeyer *et al.* (2014) analisaram a performance de um concentrador plano montado em V para concentrações fotovoltaicas e térmicas. O sistema teve um rendimento aumentado em 25%, mas apresentou perdas térmicas significativas.

Concentrador Solar Parabólico Composto (CPC)

O concentrador solar parabólico composto (CPC) teve seu princípio desenvolvido por Welford e Winston (1978). Sua configuração é baseada na união de dois segmentos de curvas parabólicas. A taxa de concentração desse modelo vai usualmente até 25 sois, com temperaturas variando entre 100°C e 250°C.

Tem como principal vantagem, devido as múltiplas reflexões internas que possui, uma coleta dos raios solares ampla através de ângulos de incidência variados. Logo, possui um ângulo limite maior necessitando de ajustes de rastreamento casuais. Podem ser simétricos ou assimétricos e, assim como o coletor plano, não tem formação de imagem (ROSA, 2013). O absorvedor fica localizado na parte inferior do colector e pode assumir o formato plano, bifacial, de cunha, ou cilíndrico, como ilustrado na Figura 2.19.

Tao *et al.* (2011) analisaram diferentes tipos de curvatura inseridas em um CPC, comparando ganhos térmicos e os índices de concentração. O objetivo era minimizar a quantidade de material utilizado. Harmim *et al.* (2012) propuseram um novo tipo de fogão solar baseado em um CPC assimétrico. A disposição do vidro da abertura do absorvedor, nesta proposta, ficou na vertical.

Reichl *et al.* (2013) compararam as medições experimentais de fluxo por Particle Image Velocimetry (PIV) e termopares, com resultados simulados por fluidodinâmica computacional. Foi possível reproduzir as correntes de convecção natural somente pela simulação em três dimensões, enquanto que os fluxos de calor e a distribuição de temperatura, bastaram uma simulação em duas dimensões.

Li *et al.* (2013b) testaram dois modelos de CPC com um absorvedor em forma de U mantido à vácuo. Um deles possuía o índice de concentração de três e o outro de seis.

Nos testes ópticos o primeiro teve uma eficiência óptica de 74%, uma eficiência térmica de 51% e não era necessário movimentá-lo durante o dia. O segundo apresentou uma eficiência óptica de 70%, uma eficiência térmica de 54% mas tinha a necessidade de 5 ajustes diários.

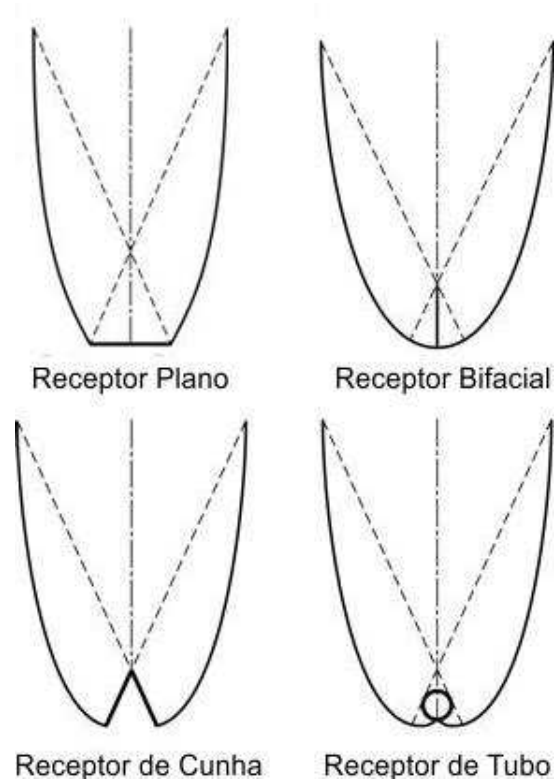


Figura 2.19: Concentrador Solar Parabólico Composto (CPC), adaptado de Kalogirou (2009)

Ulavi *et al.* (2014) utilizaram um CPC em formato de persiana. Esse modelo foi idealizado em uma janela com uma película seletiva de bandas espectrais. O objetivo era mensurar a quantidade de luz que entrava no ambiente (pela transmitância visível), o ganho térmico do fluido que passava pelo absorvedor e o isolamento térmico proporcionado. A eficiência térmica foi de 44%, o isolamento resultou em $2 \text{ W.m}^{-2}\text{K}$ e a transmitância visível foi de 0,59.

Concentrador Solar de Calha Cilíndrico (CSC)

O concentrador do tipo calha, cilíndrico ou calha-parabólica, possui foco linear e um fator de concentração ideal máximo de aproximadamente 212 sois, conforme Duffie e Beckman (2013), porém, as versões tradicionais fornecem uma índice de concentração entre 25 e 100 sois (DINCER; ZAMFIRESCU, 2014).

Seu funcionamento é baseado na concentração de raios solares, pela superfície refletora,

em um tubo absorvedor instalado no foco da parábola e com comprimento igual ao do coletor, ilustrado na Figura 2.20. Esse modelo, usualmente vem acompanhado por um sistema de rastreamento de um eixo, trabalhando no sentido Leste-Oeste ou Norte-Sul.

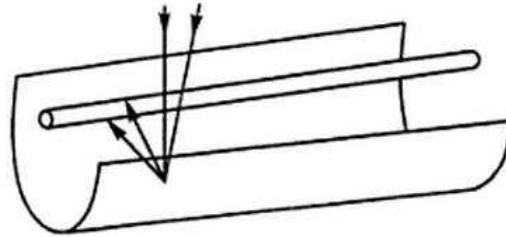


Figura 2.20: Concentrador Solar Cilíndrico, adaptado de Garg e Prakash (2000).

Nesse tipo de concentrador, a faixa de temperatura está entre $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que foi objeto de estudo de Mwesigye *et al.* (2013), relacionando também os valores de Entalpia. Pode ser utilizado como agente motriz de bombas para irrigação, em aquecimento de águas de caldeiras e em estações elétricas.

Huang *et al.* (2012) propuseram um novo método analítico para otimizar a performance de um CSC. Estudaram sobre os efeitos resultantes de erros ópticos, rastreamento, posição de instalação, variação de transmitância e de absorvidade no tubo absorvedor.

Jaramillo *et al.* (2013) projetaram, construíram e avaliaram, 5 modelos de CSC, com áreas de $2,6\text{ m}^2$ e índice de concentração de 14 sois, por unidade. Três deles foram planejados com ângulo de borda de 90° e os outros dois com o ângulo de 45° . A eficiência térmica máxima do modelo de 90° foi praticamente o dobro do modelo de 45° . O sistema em série desses coletores forneceu uma temperatura de 110°C e um vapor de baixa qualidade.

Dersch *et al.* (2014) compararam duas estações de CSC, utilizando modelos termodinâmicos. A primeira planta, híbrida, trabalhava também com gás natural o qual aquecia o vapor a 540°C . A outra, teve como fluido térmico uma solução salina. A redução de custo foi na ordem de 10%, sendo a fusão de sal mais vantajosa.

Xu *et al.* (2014) confrontaram a performance de CSC utilizando dois materiais de reflexão, vidro e película espelhada, e duas direções de rastreamentos, uma no sentido Norte-Sul e outra no sentido Leste-Oeste. A eficiência térmica do vidro foi 50% inferior a da película e o melhor sentido de rastreamento constatado foi o Leste-Oeste.

Balghouthi *et al.* (2014) avaliaram a óptica de um CPC localizado na Tunísia. Através de fotogrametria e de ajustes feitos via MATLAB, foi possível determinar o fator de intercepção, a eficiência térmica e as perdas oriundas de imprecisões de rastreamento.

Concentrador Solar de Disco (CSD)

Outro modelo de concentrador é o do tipo bacia parabólica, paraboloide, parabólico de revolução ou simplesmente de disco. Possui foco pontual e tem uma taxa de concentração máxima teórica de 45000 para situações ideais (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Todavia, conforme Dincer e Zamfirescu (2014), os índices de concentração em projetos usuais estão entre 600 e 2000.

Seu funcionamento baseia-se na concentração de raios solares, pela superfície refletora, direcionando-os para um absorvedor pontual instalado no foco da parábola, ilustrado na Figura 2.21. A faixa de temperatura atingida está entre 100 e 1500°C sendo utilizada usualmente para a geração de energia elétrica, para o funcionamento de fogões solares e de outros equipamentos que exijam altas temperaturas. O rastreamento indicado para esse mecanismo é o de dois eixos (BORN; WOLF, 1975).

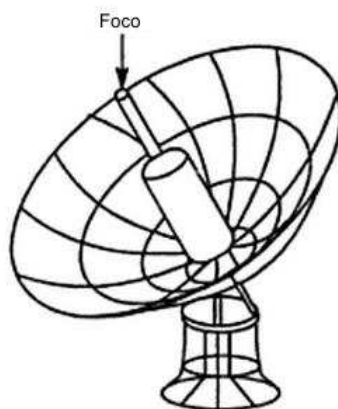


Figura 2.21: Concentrador Solar de Disco, adaptado de Garg e Prakash (2000).

Lovegrove *et al.* (2011) descreveram a construção e operação de um CSD de 500 m² localizando na Australian National University (ANU), composto por 380 painéis esféricos de 1,17 m de lado o que possibilitou um índice de concentração de 2000 sois.

Villeda-Muñoz *et al.* (2011) elaboraram um projeto de forno solar com um aparato que mescla um disco parabólico e um heliostato. Neste caso, o objetivo era auxiliar na produção de tijolos de argila, o que resultaria em um impacto socioeconômico positivo nas comunidades carentes locais.

Liu *et al.* (2012) propuseram o desenvolvimento de um concentrador solar baseado em 164 espelhos quadrados e planos com um tamanho de 24,1 cm de lado cada. Neste sistema, que se aproxima de um CSD, foi possível contabilizar uma taxa de concentração de 108.

Bakos e Antoniadis (2013) simularam uma planta de energia solar composta por discos parabólicos que usavam a reflexão de uma película elástica. Os resultados apresentam um

retorno do investimento de 16 anos para uma produção anual de 11,19 GWh.

Li *et al.* (2013a) estudaram a performance de um concentrador baseado na abertura e no fechamento de uma proteção de vidro na cavidade do absorvedor. Concluíram que um erro óptico menor do que 4 mrad favorece um receptor aberto, enquanto que se o erro for maior do que 4 mrad, é preferível que a cavidade do absorvedor esteja fechada.

Concentrador Solar do Tipo Torre

O modelo de concentrador do tipo torre possui superfícies reflexivas côncavas ou planas que circundam um absorvedor fixo, localizado no topo de uma torre, conforme Figura 2.22.

Esses espelhos, possuem um sistema de rastreamento de dois eixos se posicionando de tal modo com que os raios solares sejam direcionados e concentrados no absorvedor. O fluido térmico contido no absorvedor acionará um gerador mecânico de energia que funciona em um ciclo termodinâmico tal qual o de Rankine ou o de Brayton (KREITH; KREIDER, 2011). A faixa típica de temperatura está entre 300 °C e 1500 °C e índice de concentração de 150 a 2000 sois (KALOGIROU, 2009).

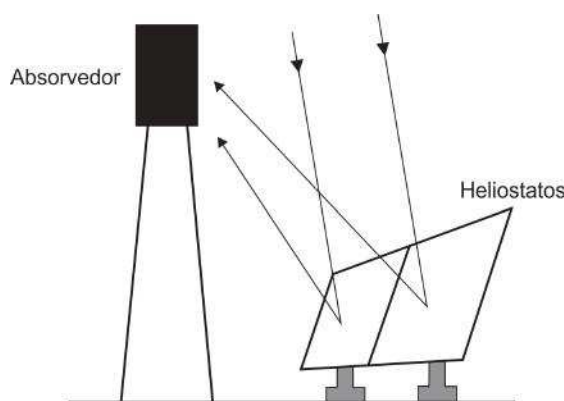


Figura 2.22: Concentrador solar do tipo torre, adaptado de Breeze (2005).

Nesse sistema há a possibilidade de armazenamento de energia através da fusão do sal (60% Nitrato de Sódio e 40% Nitrato de Potássio), o que garante um estoque para os períodos noturnos e dias com condições desfavoráveis (BAUER *et al.*, 2013).

Pitz-Pall *et al.* (2011) propuseram uma configuração para otimizar heliostatos, visando atingir altas temperaturas em processos termoquímicos. Enquanto que González-Pardo *et al.* (2014) sugeriram a implementação de unidades de heliostatos nas fachadas de prédios novos e já existentes.

Roca *et al.* (2013) implementaram um controle de temperatura em um reator de hidrogênio utilizando como fonte térmica heliostatos. Neste sistema, a temperatura pretendida não poderia ultrapassar os 1200°C, o que foi feito com sucesso.

Zamfirescu e Dincer (2014) integraram um concentrador solar do tipo torre para aproveitar a energia solar em quatro sistemas diferentes: através da fotocatalise, por captação fotovoltaica, por aquecimento e por energia química de armazenamento. Para isso, a luz foi dividida em três espectros, sendo possível produzir hidrogênio e enxofre, gerar eletricidade com as matrizes fotovoltaicas e por acionamentos térmicos oriundos do ciclo de Rankine.

Sun *et al.* (2014) analisaram o alinhamento real de heliostatos de uma planta de 1 MW e o comparou com o método teórico de Monte Carlo para o traçamento de fluxo solar. Os resultados foram discrepantes o que indicou a necessidade de um realinhamento utilizando o método de centralização.

Zang *et al.* (2014) estudaram os efeitos de tensão e deslocamento que o vento causa ao atingir heliostatos em diferentes orientações. Um modelo de computacional foi considerado confiável para prever os efeitos do vento desde que eles sejam superdimensionados em cerca de 10%.

Lente de Fresnel

Embora a maioria dos concentradores solares utilizem sistemas baseados na reflexão, o modelo de Lente de Fresnel, mais compacto que as lentes convencionais, utiliza-se dos princípios da refração. Nesse caso, o concentrador é composto por uma ou mais lentes que criam um ponto, uma linha ou uma área de concentração dos raios solares, conforme ilustrado na Figura 2.23. Eles são absorvidos na zona focal e repassados para a função desejada, que, como nos outros casos, pode ser a geração de energia elétrica, o aquecimento de tubulações, a climatização de ambientes, etc.

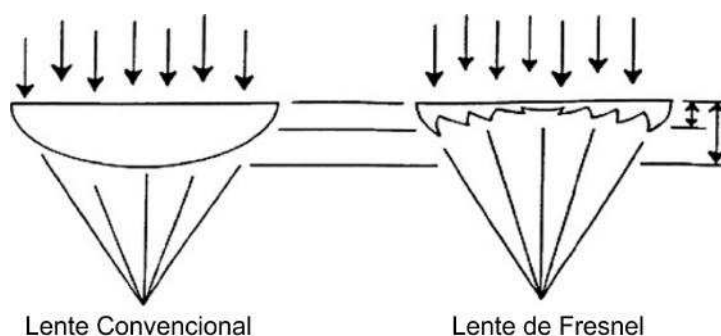


Figura 2.23: Concentrador refrator do tipo Lente de Fresnel, adaptado de Xie *et al.* (2011).

Fang *et al.* (2013) elaboraram experimentalmente um sistema que transforma a radiação solar em uma fonte de radiação laser monocromática. A eficiência obtida de $3,5 \text{ W.m}^{-2}$, ainda é insuficiente para alguma aplicação, mas as perspectivas dessa tecnologia são otimistas.

De forma semelhante, Xie *et al.* (2013) analisaram a performance de absorvedores com cavidade para uma Lente de Fresnel com foco pontual. Os formatos foram cônico, esférico, cilíndrico e hemisférico. O modelo mais eficiente foi o cônico.

Michel *et al.* (2014) propuseram a utilização de uma Lente de Fresnel com separação de luz em dois pontos. Para isso, um sistema de difração da luz foi sobreposto à lente, os propósitos foram para aplicações espaciais. O modelo resultante apresentou uma eficiência óptica de cerca de 75%.

Lin *et al.* (2014) estudaram a performance de diversos tipos de absorvedores com cavidade utilizando Lente de Fresnel com foco linear. Os formatos foram o de arco, o triangular, o semicircular e o retangular. Desses, o modelo mais eficiente em termos ópticos foi o triangular e em termos de perda de calor foi o formato de arco.

Nia *et al.* (2014) investigaram experimentalmente um sistema de cogeração de energia termoeletrônico. Utilizaram uma Lente de Fresnel com foco pontual direcionada para um módulo termoeletrônico, a área do concentrador era de $0,09 \text{ m}^2$ proporcionando uma eficiência de 51,33% com uma radiação de $705,9 \text{ W.m}^{-2}$.

2.3 Destilação

A destilação é um processo de separação de misturas homogêneas caracterizado por uma dupla mudança de estado físico. Inicialmente, a substância em estado líquido é aquecida até atingir a temperatura de ebulição tornando-se vapor. Então, ela é captada e resfriada novamente, voltando ao estado líquido. É geralmente utilizado para purificação de substâncias e para a fabricação de essências e óleos.

Assim sendo, dois tipos são usuais: a destilação simples e a destilação fracionada. A primeira é indicada para purificação de líquidos contendo impurezas voláteis dissolvidas e para quando os pontos de ebulição das substâncias são distantes. Logo, as substâncias mais voláteis evaporam e são direcionadas para um condensador para serem recolhidas em um reservatório.

Já a destilação fracionada é sugerida quando os pontos de ebulição dos componentes de uma mistura são próximos. Neste processo, o líquido e o vapor estão em equilíbrio em cada ponto de uma coluna de fracionamento. Todavia, suas composições variam de acordo com a altura. Logo, o componente mais volátil pode ser removido pelo topo da coluna antes que o próximo componente, que possui ponto de ebulição abaixo, destile (ATKINS; JONES, 2010). É um processo utilizado para o refino do petróleo e também para controlar o teor alcoólico de bebidas.

2.4 Evaporador Solar

O uso do evaporador solar é uma alternativa principalmente para regiões próximas ao mar, em áreas desprovidas de rios e regiões interiores que possuem poços artesianos com elevado teor de sal. Segundo Daniels (1980), o custo de funcionamento baixo, a necessidade mínima de mão de obra e a facilidade de instalação são os maiores atrativos. É um sistema conhecido pela humanidade desde a época de Aristóteles e pode ser visto como uma importante estratégia de combate às deficiências hídricas e energéticas.

2.4.1 Histórico

A captação da energia solar para o tratamento por separação de água salobra tem uma grande prerrogativa por envolver mecanismos sustentáveis e de baixo-custo sendo, portanto, uma solução viável para aquisição de água doce.

Segundo Talbert *et al.* (1970), o conceito de um evaporador solar vem desde os tempos do filósofo Aristóteles, no século IV a.C. Sem embargo, as aplicações práticas provavelmente surgiram diante da necessidade de produzir água doce nas embarcações de longa distância (KALOGIROU, 2005).

No século XV d.C. alquimistas árabes produziam água potável à partir de água salgada, em 1559, Giovanni Battista Della Porta escreve a segunda edição do livro *Magiae Naturalis* mencionando sete métodos de destilação, um deles descrevendo um evaporador solar (DELYANNIS, 2003). Em 1742, o jesuíta Nicolo Ghezzi na Itália, faz o primeiro registro oficial de um evaporador solar. Por volta de 1774, Lavoisier utiliza uma lente para concentrar os raios solares em frascos proporcionando a destilação, em 1870 ocorre a primeira patente americana testada por Wheeler e Evans (1870). Dois anos depois, em 1872, a primeira unidade em grande escala foi construída por Charles Wilson na cidade de Las Salinas, no Chile. Conforme relata Delyannis (2003), essa unidade possuía uma área total de 4450 m^2 com 64 reservatórios de água feitos de madeira preta e recobertos por vidros inclinados. Produzia diariamente 22700 litros de água potável alimentadas por um efluente de alta salinidade (140000 ppm).

Os interesses pela dessalinização solar se estenderam às tropas das duas guerras mundiais, em meados do século XIX, promovendo o desenvolvimento de modelos com coberturas inclinadas, do tipo telhado e infláveis. Desde então, plantas de dessalinização tem sido construídas em Portugal, Índia, Grécia e em vários locais do Oriente Médio (KALOGIROU, 2009).

2.4.2 Mecanismo

A distribuição da energia solar e os processos de transferência de calor e de massa são a base do funcionamento de um evaporador solar. Embora haja diferenças de geometria entre eles, o mecanismo é basicamente o mesmo: captação da radiação solar, evaporação de água salgada, condensação da água destilada e cristalização do sal. Quanto ao rendimento, segundo Bezerra (1998), da radiação solar incidente no evaporador, 68% é dissipada pelo vidro, pelas paredes do destilador, por refletividade, por isolamento térmico não ideal, restando apenas 32% de energia útil.

2.4.3 Modelos

Os modelos de evaporador solar comumente empregados são: o evaporador solar aberto, evaporador solar de efeito simples/múltiplo, o evaporador solar de mecha e o evaporador solar de umidificação-desumidificação.

Evaporador Solar Aberto

O evaporador solar aberto não possui cobertura, logo um contato direto entre a atmosfera e a água é estabelecido. Seu funcionamento é inspirado no ciclo físico da água e tem como principal função a obtenção de sal. A Figura 2.24 apresenta uma vista esquemática deste equipamento.

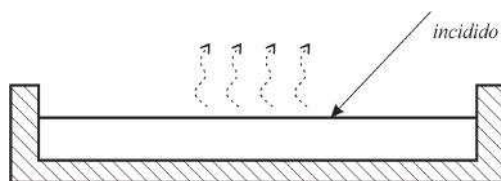


Figura 2.24: Corte transversal de um evaporador solar aberto, adaptado de Duffie e Beckman (2013).

Evaporador Solar Simples

O evaporador solar convencional, ou simples é coberto por um ou dois vidros inclinados contendo: um depósito de água salobra, sistemas de controles de nível de água, calhas para captação de água destilada e um isolamento térmico da estrutura.

Seu funcionamento é baseado na entrada da radiação solar no evaporador que aquece a água salobra ou salgada localizada na parte plana do equipamento. Ela evapora e condensa

na superfície do vidro, sendo coletada por calhas laterais. A Figura 2.25 apresenta esse modelo.

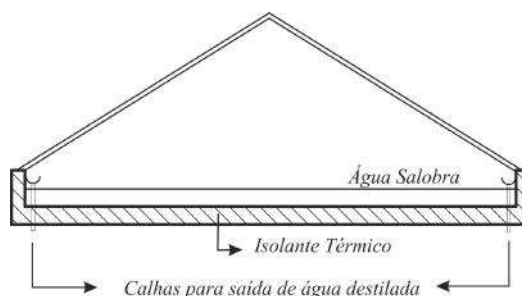


Figura 2.25: Corte transversal de um evaporador solar simples, adaptado de Duffie e Beckman (2013).

O comparativo de eficiência entre o evaporador aberto e o evaporador solar simples foi estudado por Santori (1996) que afirmou que a taxa de evaporação no evaporador de efeito simples é menor do que no evaporador aberto, mesmo com temperaturas da água iguais.

El-Bahi (1999) estudou o desempenho do evaporador solar simples considerando um condensador e a ausência dele. Assim sendo, observou uma diminuição na produção de cerca de 70 % quando não se utilizava o condensador.

Asadi *et al.* (2013) utilizaram um evaporador solar simples para o tratamento de águas residuárias. O sistema removeu com sucesso contaminantes inorgânicos, orgânicos e bactérias sendo indicado para esse fim.

El-Agouz (2014) complementaram um evaporador solar simples, com um tanque de armazenamento térmico e inseriu degraus na base do absorvedor. A água salgada era bombeada e descia a escadaria em um efeito cascata. Dois tipos de absorvedores foram testados, um era uma superfície pintada de preto e outro se tratava de uma malha algodão. Nos dois casos a produtividade, comparada a um evaporador simples, aumentou em mais de 40%.

Evaporador Solar de Efeito Múltiplo

O evaporador solar de efeito múltiplo foi concebido para aumentar a eficiência do evaporador simples. Possui somente um lado inclinado e contém internamente camadas que correspondem aos estágios. Cada estágio possui alimentação própria de água salobra ou salgada, calhas para recolhimento da água destilada e dispositivos para o transporte da água que não foi destilada até a bandeja inferior. O nível de água dessas bandejas deve ser constante. A Figura 2.26 representa o corte transversal de um evaporador com três estágios.

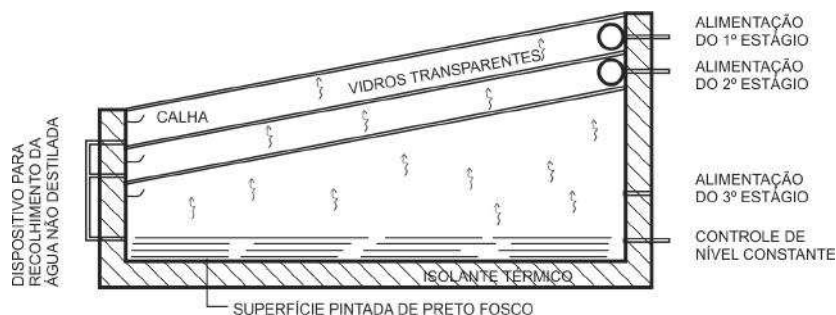


Figura 2.26: Evaporador solar de múltiplo efeito com três estágios, adaptado de Bezerra (1998).

Segundo Talbert *et al.* (1970) em um sistema com dez estágios a produção de água destilada aumenta em até seis vezes quando comparado a um evaporador de efeito simples de mesma área.

Farahbod *et al.* (2013) elaboraram um estudo teórico e experimental de um evaporador solar de efeito múltiplo contendo três estágios. O efluente alimentado continha 5,45% de sais e a produção diária, considerando 12 horas de operação, variou entre 2,8 L.m⁻² e 5,0 L.m⁻². Enquanto que Palenzuela *et al.* (2014) fizeram uma avaliação matemática da Plataforma Solar de Almería, que utiliza um evaporador de efeito múltiplo.

Evaporador de Mecha

Esse evaporador tem um sistema semelhante ao evaporador solar de efeito múltiplo, com apenas um lado inclinado e estágios internos. Possui diferenças quanto ao tipo de alimentação de água salobra e no sistema de isolamento térmico.

No evaporador de mecha, uma ou mais chapas metálicas pintadas de preto fosco (face superior) dão sustentação a um tecido poroso, conhecido como mecha, que passa pela parte inferior da chapa. Dois rolos tencionam as extremidades do tecido o qual é mergulhado em um recipiente contendo água salobra ou salgada.

A última chapa é pintada de branco e funciona como um condensador. As laterais e o topo são isolados termicamente porém a parte inferior é aberta, mantendo-se em contato com o ar ambiente. A representação desse modelo é feita na Figura 2.27.

O processo térmico desse equipamento foi simulado por Tanaka (2011). Já Mahdi *et al.* (2011) construíram um evaporador solar de mecha e verificaram os efeitos causados pela concentração de sal na evaporação. O rendimento caiu de 37,7% para 20% quando a concentração de NaCl na solução aumentou de 0% para 10%.

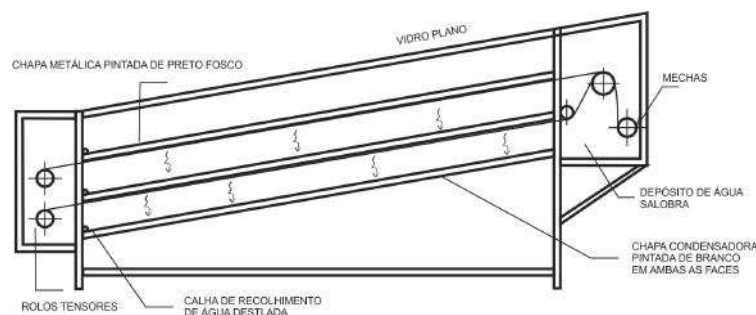


Figura 2.27: Evaporador solar de mecha, adaptado de Bezerra (1998).

Evaporador Solar via Umidificação-Desumidificação (UD)

O processo de destilação via umidificação-desumidificação coloca em contato um fluxo de ar aquecido com água salgada pulverizada. Como o ar tem capacidade de retenção de cerca de 500 g de vapor de água por kg de ar, ocorre um arraste deste vapor. Logo, o ar umidificado, entra em contato com uma superfície de resfriamento que permitirá a condensação da água destilada (KALOGIROU, 2009).

Neste processo, tanto o ar quanto a água com sal são aquecidos por coletores solares, o processo de resfriamento é geralmente alimentado diretamente pela fonte de água com sal, servindo também como pré-aquecedor, conforme ilustra a Figura 2.28.

Segundo Parekh *et al.* (2004) essa técnica pode ser perfeitamente ajustada à destilação de águas oceânicas de forma descentralizada, tendo como principais vantagens: a flexibilidade na capacidade, os custos moderados de instalação e operação, a simplicidade e a energia termal de baixo custo. O sistema solar de umidificação-desumidificação de Kalogirou (2001) obteve uma produção anual de $11,2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ de água dessalinizada.

Franchini e Perdichizzi (2014) simularam a operação de um sistema de baixa temperatura baseado em um processo UD. Duas configurações foram comparadas, um sistema integrado e outro separado, entre as unidades de resfriamento e de aquecimento solar. O desempenho dos dois sistemas foi bastante sensível à temperatura do mar alimentada, o sistema integrado foi o que obteve melhores resultados.

El-Agouz *et al.* (2014) testaram experimentalmente uma unidade UD operando com duas bombas e composta por um coletor solar de 1 m^2 e um tanque de armazenamento térmico. O sistema considerou 4 vazões mássicas, a maior produtividade, $9 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$, foi associada a uma maior vazão 288 L/h.

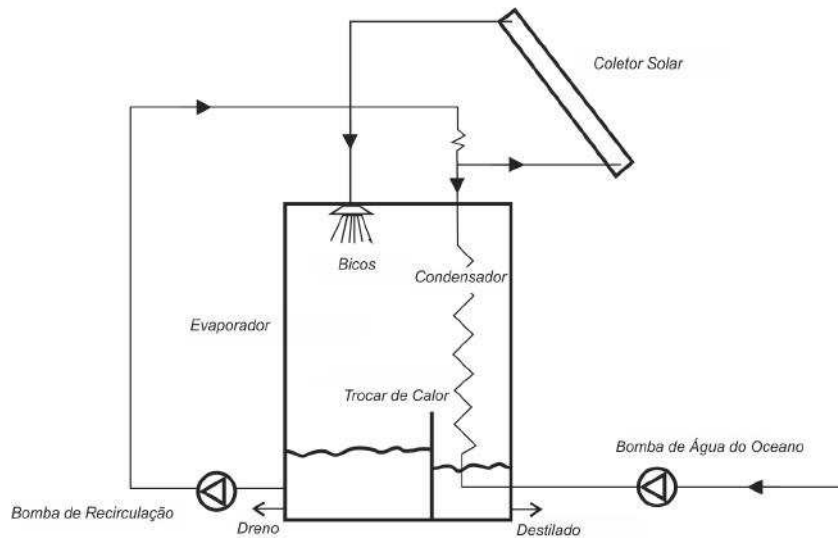


Figura 2.28: Evaporador solar via umidificação-desumidificação, adaptado de Kalogirou (2001).

Sistema Híbrido: Concentrador Solar e Evaporador

Um evaporador solar pode ser aperfeiçoado anexando à ele um coletor solar do tipo plano ou concentrado, trabalhando em diversas configurações. Mohamed e El-Minshawy (2011) simularam matematicamente um CSC acrescido de um evaporador solar tipo UD. A produtividade de água destilada foi comparada ao longo das estações do ano sendo que o verão, teve a produção 44% superior à do inverno.

Omara e Eltawil (2013) compararam a produtividade entre um evaporador solar convencional com um pré-aquecedor de pvc e um sistema de evaporação solar composto por um CSD com rastreamento em dois eixos, um pré-aquecedor de pvc, um boiler e um condensador. Considerando uma produtividade diária de 9 horas o primeiro conjunto produziu 3 L.m^{-2} e o segundo $6,7 \text{ L.m}^{-2}$.

Arunkumar *et al.* (2013) estudaram os efeitos no rendimento do destilado ao adicionar esferas pretas recheadas de parafina. Isso porque a parafina é um material de mudança de fase (PCM), capaz de armazenar grande quantidade de calor. Um CSD foi acoplado a um evaporador solar convencional e a produtividade diária considerada foi de 9 horas. As melhores produtividades foram de $4,46 \text{ L.m}^{-2}$ e $3,52 \text{ L.m}^{-2}$ para o sistema com e sem o PCM, respectivamente.

Elsafy e Abbas (2013) acoplaram um CSC a um condensador independente. A produtividade foi investigada considerando duas direções de rastreamento, uma no sentido Norte-Sul e outra no sentido Leste-Oeste. Essa última foi mais eficiente tanto para um sistema de rastreamento manual quanto para um sistema de rastreamento automático. Para o sistema manual, o direcionamento Leste-Oeste foi 30,95% mais eficiente, enquanto

que para o sistema automático essa vantagem subiu para 69,38%. O sistema automático foi em média 2,67 vezes superior.

Riffat e Mayere (2013) compararam a performance de três tipos de concentradores, simulando a interação com um evaporador UD, que eram: tipo espelho plano, CPC e um modelo em formato V com modificações na área do absorvedor. Esse último, apresentou maior produtividade simulada que os outros dois, desde que a temperatura requerida seja superior a 80°C. Caso contrário, o tipo espelho plano é mais vantajoso em termos de custo-benefício.

Mahmoud *et al.* (2013) utilizaram uma Lente de Fresnel para auxiliar na dessalinização de um evaporador solar UD de forma teórica e experimental. A lente, com 50 cm de comprimento e 70 cm de altura, teve uma eficiência de 70% em dias claros. A água salgada atingiu uma temperatura de 90°C com vazões de 27 e 40,8 L/h. Mesmo assim, o modelo teórico foi 25% superior que o experimental.

Liu *et al.* (2014) propuseram um sistema de dessalinização composto por um evaporador multi-estágio, integrado a quatro unidades concentradoras do tipo CPC em série, com um índice de concentração de 2,5 sois e refletividade de 0,85. O absorvedor, envolvido por vidro despressurizado, possuiu um sistema interno de troca de calor via tubos concêntricos. A eficiência térmica encontrada foi de 0,4 e a produção diária de 7,87 kg.m⁻² considerando uma radiação média de aproximadamente 789 W.m⁻².

Al-Sulaiman *et al.* (2014) também analisaram um conjunto de evaporador UD aquecido por um CPC com área de abertura de 25 m². O estudo verificava a produtividade do sistema em duas situações: com a alimentação do ar quente antes do umidificador e entre o umidificador e o desumidificador, que eram separados. A segunda configuração foi cerca de 3 vezes mais eficiente que a primeira.

Gorjian *et al.* (2014) montaram um CSD com um absorvedor de cromo pintado de preto. A água salobra pré-aquecida, alimentava o absorvedor e conduzia o vapor para um trocador de calor. Operando durante 7 horas por dia foi possível obter 3,56 kg.m⁻²

Reddy *et al.* (2014) simularam um concentrador acoplado com uma unidade de evaporação multi-estágios visando um modelo que não necessita-se de rastreamento. Para o absorvedor proposto, o índice de concentração chegou a 5,83 sois com temperatura de saída de 67°C.

Stuber *et al.* (2015) testaram uma planta piloto comercial para o tratamento e recuperação de água salobra de drenagem agrícola. O sistema foi montado com um conjunto de CSC com uma área de abertura de 656 m² e um evaporador solar de efeito-múltiplo, com circulação forçada, um condensador final. Os resultados foram apresentados em termos da

razão entre a energia consumida e o total de água produzido em sua melhor configuração $133,2 \text{ kWh}_{th} \cdot \text{m}^{-3}$.

Outros Mecanismos

Além dos métodos tradicionais, outros mecanismos vem sendo estudado por pesquisadores para dessalinização solar como por exemplo Al-Kharabsheh e Goswami (2003) que propõe a inserção de um sistema de vácuo por gravidade no evaporador solar. O método por compressão de vapor estudado por Helal e Al-Malek (2006) que utiliza um compressor para aquecer vapor de água salgada. A chaminé solar citada por Zuo *et al.* (2011) que converte energia solar em energia cinética e por sua vez em elétrica, produzindo, também, água destilada.

Outro sistema de dessalinização é por congelamento, que utiliza indiretamente a energia do Sol, resfriando a água salgada até o que ponto de congelamento. Desta forma, cristais são formados na superfície, compostos por água pura. Madani (1992) afirma que esse método é mais eficiente que a destilação. Enquanto que Wu *et al.* (2012) analisam experimentalmente um método por adsorção, consistindo de um evaporador que esquentar a água salgada e direciona o vapor para um leito absorvedor de sílica, que logo em seguida a encaminha para um condensador.

Há ainda o método por colunas flash simples e multi-estágios, descrito por Sharon e Reddy (2015). Neste caso, a água salgada é aquecida acima da temperatura de saturação e direcionada para sucessivas colunas flash mantidas à vácuo. Em cada estágio, elas recuperam o condensado de água destilada. De qualquer forma, os desafios para os futuros inventos se baseiam na diminuição da área de captação solar, na redução de custos e, evidentemente, em uma melhor eficiência.

2.5 Água

A água, hidreto de oxigênio ou óxido de hidrogênio (H_2O , $\text{H} - \text{OH}$) é a molécula mais profusa da superfície terrestre cobrindo sob forma líquida e sólida, cerca de 75% desse planeta (MCFADDEN *et al.*, 2007). Em condições ambientes de temperatura e pressão é um líquido levemente azul, praticamente incolor em pequenas quantidades (SMIRNOV, 1993), inodoro e insípido. Raramente é encontrada em sua forma pura pois muitas substâncias se dissolvem nela, fato esse que a torna conhecida como “solvente universal” (VOET *et al.*, 2013).

Tem natureza anfótera, isto é, pode agir tanto como ácido quanto como base e

encontra-se em três estados: o sólido, conhecido como gelo, o gasoso ou vapor d'água e a fase líquida, referenciada como água. As condições de temperatura e pressão na qual a água sólida, líquida e gasosa coexistem em equilíbrio é chamada de ponto triplo da água. Esse ponto é usado para definir as unidades de temperatura em escalas tais quais as de Kelvin, Celsius, Newton e Fahrenheit. Acima da temperatura e pressão crítica de 647 K e 22,064 MPa, as moléculas de água assumem uma condição supercrítica, em que aglomerados líquidos flutuam numa fase de vapor.

2.5.1 Estrutura Molecular

A base molecular da água liga de forma covalente dois átomos de hidrogênio a um átomo de oxigênio. A água, tem natureza polar e sua molécula tem uma forma angular, com os átomos de hidrogênio nas extremidades e o de oxigênio no vértice. O átomo de oxigênio possui mais força de atração de elétrons do que o átomo de hidrogênio, logo, ele terá carga negativa e o átomo de hidrogênio, positiva.

A presença dessas cargas fornece a água um momento dipolo, ocasionando maior aproximação, dificuldade de separação e, por consequência, elevando o ponto de ebulição. Essa atração, conhecida como ligação de hidrogênio, provoca ainda uma alta entalpia de vaporização, 44 kJ.mol^{-1} a 25°C , e um alto calor específico, a 1 atm, $1 \text{ cal.g.}^\circ\text{C}^{-1}$. Essas duas propriedades permitem à água moderar o clima da Terra, amortizando flutuações grandes de temperatura. A entalpia específica da fusão da água também é alta (cerca de 6 kJ.mol^{-1} a 0°C), essa característica dá as geleiras resistência ao derretimento (ATKINS; PAULA, 2011).

2.5.2 Densidade

A água, da mesma forma que outras substâncias, aumenta sua densidade à medida que a temperatura decresce, o que está ilustrado na Tabela 2.2. No entanto, a $3,98^\circ\text{C}$, antes do seu ponto de fusão, ela atinge sua densidade máxima e, ao aproximar desse ponto, sob condições normais de pressão, expande-se e torna-se menos densa, ao contrário do que ocorre com a maioria dos demais elementos que se contraem.

Isso se deve à estrutura de organização molecular do gelo, que ao resfriar, se orienta em uma configuração de rede cristalina hexagonal que alonga as componentes rotacionais e vibracionais das ligações, de forma a afastar cada molécula de água. Esse fenômeno desempenha um papel importante no ecossistema terrestre sobretudo à vida aquática no inverno, impossibilitando que os oceanos, rios e lagos das regiões polares se congelem por

completo, tornando-se sólidos desde a superfície até as profundezas. A água congela a 0 °C, mas pode ser superfundida em estado fluido até aproximadamente -40°C (FEGLEY, 2013).

Tabela 2.2: Densidade da água, adaptado de Lide (2008).

Temperatura (°C)	Densidade (g.cm ⁻³)
100	0,95840
80	0,97182
60	0,98320
40	0,99222
30	0,995650
25	0,9970480
22	0,9977730
20	0,99821
15	0,9991016
10	0,99970
4	0,9999750
0	0,9998426
-10	0,9982
-20	0,9935
-30	0,9839

2.5.3 Tensão Superficial

A tensão superficial é um efeito físico que faz com que a camada da superfície de um líquido se comporte como uma membrana elástica através de atrações laterais e internas. As gotas de água são estáveis devido à alta tensão superficial desse elemento, corresponde a 72,8 mN/m em 20 °C, sendo a mais alta dos líquidos não-metálicos (BIRDI, 2009). Essa propriedade também é responsável pela flutuação de insetos na água, pela formação de bolhas de sabão e pela imiscibilidade entre líquidos polares e apolares.

2.5.4 Água Destilada

A água destilada pode ser obtida por meio da destilação, da combustão do gás hidrogênio, de desumidificadores ou até mesmo pela chuva, sendo, a princípio, considerada uma substância pura. Porém, um simples contato com a atmosfera basta para dissolver, por exemplo, dióxido de carbono, fato esse que explica o motivo da água da chuva apresentar um pH inferior a 7 unidades.

Pode ser utilizada em baterias, caldeiras, sistemas de arrefecimento, para aumentar a densidade do ar em aviões a jato, além de laboratórios químicos e biológicos. O benefício à

saúde humana do consumo de água destilada ainda é questionável necessitando de estudos mais aprofundados.

2.5.5 Propriedades Coligativas

São propriedades físicas que se alteram pela presença do soluto e dependem única e exclusivamente do número de partículas, seja no formato de moléculas ou de íons, que estão dispersas na solução. Logo, os efeitos coligativos não sofrem interferência pela natureza do soluto, tais como o tamanho, a massa ou a estrutura molecular, se influenciando apenas pela quantidade do soluto.

A influência resultante prevê a diminuição da pressão máxima de vapor (tonoscopia), o aumento da temperatura de ebulição (ebulioscopia), a redução da temperatura de solidificação (crioscopia) e o acréscimo da pressão osmótica (osmometria) (ATKINS; PAULA, 2011). Todas essas propriedades são originadas pela diminuição do potencial químico do solvente como resposta à presença do soluto.

Assim sendo, quando um soluto está presente, ele contribui para aumentar a entropia da solução, aumentando também a resistência da solução em se tornar gás, ou seja, o ponto de ebulição também aumenta. Da mesma forma, há uma contribuição para que a solução não permaneça em seu estado sólido o que ocasiona uma redução no ponto de fusão.

2.5.6 Salinidade

Refere-se à medida da quantidade de sais na água, logo, é a razão entre a quantidade em massa de sólidos dissolvidos com a quantidade mássica da água. Os íons de sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloro, sulfato e bicarbonato são os maiores contribuintes para a salinidade da água que pode ser expressa em ppm, mg.L^{-1} , porcentagem ou através de um adimensional conhecido como PSU (Practical Salinity Units) sendo equivalente a ppt (parts per thousand).

Para mensurá-la, diversas formas são possíveis tais como: o método do resíduo seco, a quantificação de íons de cloro, o método dos sólidos inorgânicos dissolvidos (clorinidade) e através da condutividade elétrica. Essa última, compara a condutividade de uma amostra de água, com uma solução padrão.

A Equação (2.19), padronizada pela United Nations Scientific, Education and Cultural Organization (UNESCO), é usada para converter o valor da condutividade em salinidade,

e expressa K_{15} como a razão entre a condutividade mensurada e a condutividade de uma solução padrão de cloreto de potássio com $32,4356 \text{ g.kg}^{-1}$ a uma temperatura de 15°C e à pressão atmosférica (MIRANDA *et al.*, 2002).

$$S = 0,0080 - 0,1692.K_{15}^{\frac{1}{2}} + 25,3851.K_{15} + 14,0941.K_{15}^{\frac{3}{2}} - 7,0261.K_{15}^2 + 2,7081.K_{15}^{\frac{5}{2}} \quad (2.19)$$

Quando K_{15} é igual a 1, a equação resulta em 35, que é a salinidade média das águas do oceano, ou seja, possui 3,5% de sais. Classifica-se como água doce as águas com concentrações abaixo de 0,05% sendo comum em lagos, lagoas, rios, córregos e aquíferos. De 0,05% a 3%, a água é considerada salobra e pode ser encontrada, por exemplo, em estuários, manguezais e pântanos. No caso da salinidade estar entre 3% e 5% ela é conhecida como água salina ou salgada, nível comum em águas do mar e lagos salinos. E acima de 5%, ela é classificada como água salmoura (HUBER, 2012). A Tabela 2.3, traz a salinidade de oceanos e mares do globo terrestre.

Tabela 2.3: Salinidade média de oceanos e mares, adaptado de Affholder e Valiron (2001).

Local	Salinidade
Golfo da Finlândia	0,1% - 0,2%
Golfo da Bótnia	0,2% - 0,4%
Mar Báltico	0,1% - 1,0%
Oceano Atlântico	3,49%
Oceano Índico	3,48%
Oceano Pacífico	3,46%
Mar Negro	1,7% - 2,2%
Mar Mediterrâneo	3,8%
Golfo Pérsico	3,7% - 4,0%
Mar Vermelho	3,9% - 4,2%
Mar Morto	25%

Além da temperatura, a densidade da água é dependente também da quantidade de sais dissolvidos. Para concentrações de salinidade de 3,5%, o ponto de fusão é reduzido para $-1,9^\circ\text{C}$. À medida que a superfície da água salgada inicia a sua fusão, o gelo formado é fundamentalmente isento de sal, com densidade aproximada ao gelo da água doce. Esse gelo flutua sob a superfície e o sal removido aumenta tanto a salinidade quanto a densidade das águas circunvizinhas. Tais águas afundarão por convecção e as águas que assumem a posição ao redor do gelo estarão sujeitas ao mesmo processo.

Por isso, a salinidade apresenta um papel importante nos movimentos e na mistura das massas de água, condicionando também a fisiologia de organismos que vivem submersos a ela. Entretanto, altos níveis de salinidade podem gerar problemas como à salinização

de solos irrigados, a redução de rendimentos agrícolas, a corrosão de tubulações e as mudanças nas comunidades bióticas. Para o ser humano, a tolerância limite é de 0,1%, que é considerada uma salinidade moderada. Esse índice é referência para considerá-la potável, mesmo que para testes de paladar esse valor decresça para 0,06%. Níveis mais altos de salinidade podem causar hipertensão, aborto, doenças de pele, infecções respiratórias agudas, diarreia, insuficiência renal e intestinal (VINEIS *et al.*, 2011).

2.5.7 Condutividade Elétrica

A água é um excelente condutor elétrico, propriedade essa causada pela presença de íons livres numa solução aquosa. De forma contrária, a água pura e sem íons funciona como isolante elétrico. Possibilidade essa rara, devido a eficiência que a água possui como solvente e ainda porque ela sofre auto-ionização a qualquer temperatura acima do zero absoluto. Logo, na água pura, um equipamento sensível pode detectar uma ligeira condutividade elétrica de $0,05 \mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$ a 25°C (CWT, 2004).

Este capítulo apresentou temas relacionados aos fundamentos teóricos e a revisão bibliográfica de concentradores e evaporadores solares. No capítulo seguinte, serão explicitados a metodologia e os materiais utilizados para o planejamento, construção e caracterização das unidades concentradoras propostas.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

Este capítulo foi dividido em três assuntos principais: a localização da unidade, os critérios de planejamento e construção dos equipamentos e a metodologia experimental adotada. Na primeira seção, foram descritas as coordenadas geográficas da instalação do concentrador solar, situado na cidade de Uberlândia-MG.

A seção seguinte, trata do equacionamento matemático para definição da curvatura da calha, para previsão de uma dinâmica de aquecimento e para o rastreamento solar do sistema, o que foi feito através do *software* livre SCILAB.

A última seção aborda os critérios utilizados para a parametrização do sistema, os meios de preparação da solução de água com sal utilizada nos experimentos, descreve como foi montada e apontada a unidade experimental e, por fim, indica os mecanismos utilizados para verificar a eficiência do sistema.

3.1 Localização Geográfica

A unidade experimental deste trabalho foi composta por: um concentrador solar, um evaporador, um condensador e um rastreador solar que foram devidamente instalados na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, localizada na cidade de Uberlândia-MG. Todo o equipamento foi construído e adaptado na oficina mecânica da instituição sendo ele testado no pátio, local aberto e isento da influência de sombras oriundas de árvores, construções ou quaisquer outras instalações. Em termos de coordenadas, os testes foram feitos na latitude $18,919216^\circ$ S, longitude $48,257466^\circ$ W e

altitude de 938 metros.

3.2 Planejamento e Construção da Unidade Experimental

O planejamento da unidade experimental foi estabelecido com o critério de dessalinização de água salobra e salgada utilizando concentradores solares. Esses, foram concebidos a partir do reaproveitamento de materiais em duas situações distintas: considerando um **Concentrador Solar de Disco** e um **Concentrador Solar por Lente de Fresnel**. Para fins de nomenclatura dos concentradores solares utilizados, foi atribuída a sigla CSD para o primeiro e CSLF para o segundo.

Nesse planejamento, foi investigado o tipo de curvatura por traçados ópticos e, por balanço de energia, a temperatura de equilíbrio e a rampa de aquecimento. Por se tratar de concentradores com foco pontual, foi adotado um sistema de busca de dois eixos com apontamento via algoritmo implementado em SCILAB.

3.2.1 Definição da Curvatura da Calha para o CSD

Nesta etapa, o objetivo do planejamento foi o de identificar qual era o tipo de curvatura que melhor concentrava os raios solares. Logo, baseado nas leis da óptica (HALLIDAY *et al.*, 2012), pôde-se determinar os pontos focais de uma curvatura qualquer utilizando-se dos procedimentos a seguir, ilustrados também na Figura 3.1.

1. Em um plano cartesiano é inserida a função característica da curvatura investigada $[f(x)]$;
2. Traça-se o raio de incidência solar no qual irá atingir a curvatura, de forma paralela ao eixo vertical, no ponto P (x_p, y_p) , reta i , equacionada por $x = x_p$;
3. A derivada da função $[f'(x)]$ é traçada no ponto P $[f(x)]$, o equivalente ao coeficiente angular, possibilitando a inserção da reta t que tangencia a curvatura através da Equação (3.1);

$$y - y_p = f'(x_p)(x - x_p) \quad (3.1)$$

4. Determina-se a reta n , normal à tangente do ponto P, cujo coeficiente angular é $\frac{-1}{f'(x_p)}$, conforme a Equação (3.2);

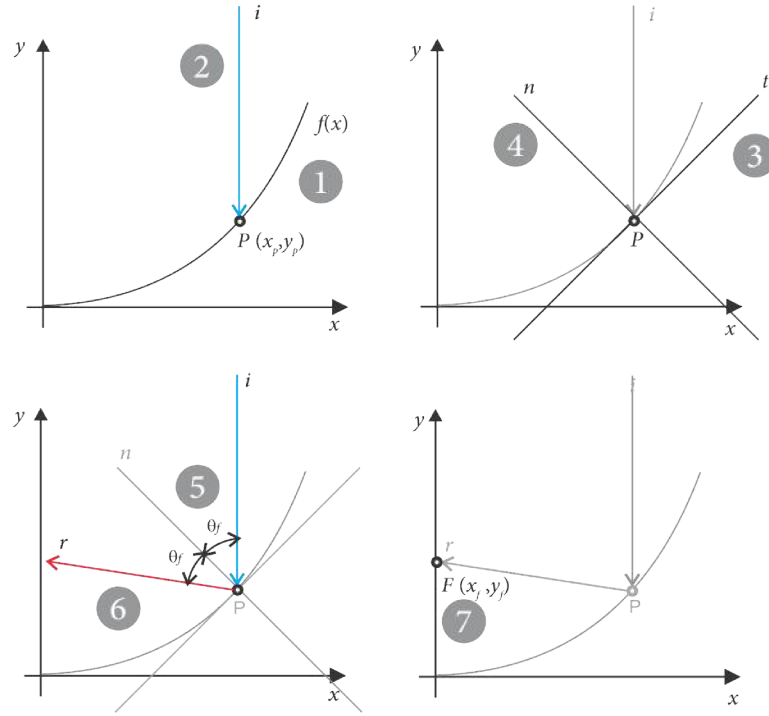


Figura 3.1: Metodologia gráfica para determinação da localização do ponto focal \mathbf{F} de uma determinada superfície.

$$y - y_p = \frac{-1}{f'(x_p)}(x - x_p) \quad (3.2)$$

5. O ângulo entre o raio incidido e a normal é o mesmo ângulo entre a normal e o raio refletido determinado por θ_f , cuja representação matemática está expressa pela Equação (3.3);

$$\theta_f = 90^\circ + \arctg\left(\frac{-1}{f'(x_p)}\right) \quad (3.3)$$

6. Sabendo que a reta r representa a reflexão do raio de incidência, ela pode ser expressa pela Equação (3.4)

$$y - y_p = \tg(90^\circ + 2\theta_f)(x - x_p) \quad (3.4)$$

7. Por fim, o ponto focal F estará sobre o eixo y exatamente onde a reta r o intercepta, cuja ordenada y_f é dada pela Equação (3.5).

$$y_f = y_p - \tg(90^\circ + 2\theta_f)(x_p) \quad (3.5)$$

Uma vez encontrado o ponto ou a região focal, fez-se uma verificação do percentual de raios refletidos que atingiriam o absorvedor, arbitrariamente estabelecido com um diâme-

tro igual a 2" para todas as superfícies. Foram três as hipóteses simplificadoras adotadas, sendo elas: uma análise bidimensional, a contabilização do porcentual de concentração se deu pelos raios secantes à circunferência do absorvedores e, por fim, não foi considerado o efeito das reflexões múltiplas. O resultado gerado foi expresso através de um gráfico que identificava os raios solares de incidência com a cor azul e os raios refletidos com a cor vermelha.

Os cálculos foram implementados via algoritmo no *software* livre SCILAB, considerando um passo de análise na ordem de 10^{-5} m, tanto para a formação da curvatura, quanto para a quantidade de raios incidentes.

Neste trabalho, foram adotadas como superfícies de interesse, as funções matemáticas geradoras das funções linear, circunferencial, senoidal e parabólica, representadas respectivamente pelas Equações 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9. Além do diâmetro do absorvedor, outro critério comum em todas as funções foi o comprimento da abertura, equivalente a 2 m.

$$y = \alpha_f + \beta_f x \quad (3.6)$$

$$y = \varphi_f - \sqrt{\rho_f^2 - (x - \lambda_f)^2} \quad (3.7)$$

$$y = \text{sen} (\gamma_f x + \mu_f) + \psi_f \quad (3.8)$$

$$y = \delta_f x^2 + \tau_f \quad (3.9)$$

A primeira configuração geométrica teorizada foi baseada em dois espelhos planos com angulação de 60° em relação a uma base horizontal (SZOKOLAY, 1979). O comprimento dos espelhos inclinados mediam supostamente $1/4$ da abertura cada um, o que correspondeu a 0,5 m para o caso investigado, e o plano horizontal media $1/2$ da abertura, ou seja, 1 m.

Em seguida foi analisada uma superfície refletora com função circunferencial de raio 1,5 m. No entanto, outros diâmetros também foram investigados. Assim sendo, os valores numéricos desses parâmetros podem ser visualizados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros das funções geradoras.

α_f (m)	β_f	φ_f (m)	ρ_f (m)	γ_f (m^{-1})	μ_f (rad)	ψ_f (m)	δ_f (m^{-1})
-0,866	1,732	1,500	1,500	1,000	$\pi/2$	1,000	0,625

Sendo que δ_f , φ_f foram arbitrários, já α_f e β_f foram baseados no modelo de Szokolay (1979) e os demais critérios foram estabelecidos considerando a intenção de centralização da curvatura no ponto de origem entre os eixos da ordenada e da abscissa. Logo, λ_f e τ_f foram nulos.

Também foi objeto desse estudo, a identificação do melhor ponto de absorção dos raios solares, para cada uma das superfícies, através do deslocamento do absorvedor ao longo do eixo y. O resultado foi apresentado através de gráficos que consolidam o deslocamento da distância focal no eixo das abscissas e a taxa de concentração dos raios interceptados pelo absorvedor, no eixo das ordenadas.

3.2.2 Dinâmica de Aquecimento do Corpo de Prova nos Concentradores Solares (CSD e CSLF)

Simulações numéricas foram elaboradas tendo como base um balanço de energia em um corpo de prova que se comportou como um absorvedor. O corpo de prova foi exposto simultaneamente à radiação solar e à convecção, com o objetivo de prever a Temperatura de Equilíbrio e a rampa de aquecimento, conforme esquema apresentado na Figura 3.2.

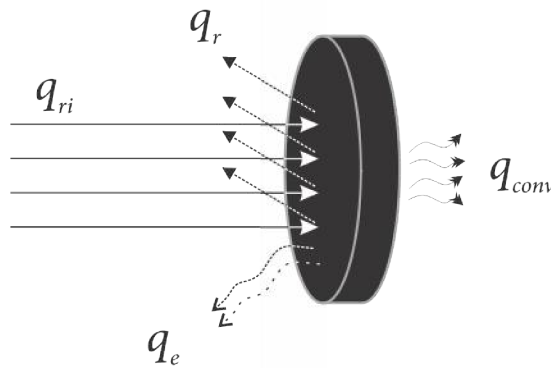


Figura 3.2: Balanço de energia em corpo de prova cilíndrico.

Esta ilustração, pode ser representada matematicamente, conforme a Equação (3.10), sendo q_{ri} a taxa de radiação refletida ou refratada pela superfície do concentrador e que atinge o absorvedor, q_r a taxa de energia incidente que é refletida pelo absorvedor, q_e a

taxa de energia emitida pelo absorvedor e, por fim, q_{conv} , a taxa de radiação perdida por mecanismo de convecção.

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = q_{ri} - q_r - q_e - q_{conv} \quad (3.10)$$

Substituindo os termos do segundo membro, fundamentado nos Fenômenos de Transporte, tem-se:

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = (\rho_p \gamma_i A_a G) - (\rho_c \tau_v \rho_p \gamma_i A_a G) - \epsilon F_{C \rightarrow V} A_{abs} \sigma (T^4 - T_\infty^4) - h A_{abs} (T - T_\infty) \quad (3.11)$$

As seguintes hipóteses simplificadoras foram consideradas:

- O foco permanece centralizado no absorvedor;
- O absorvedor tem o formato de um disco cilíndrico;
- A superfície de reflexão do coletor é perfeita e a refletividade (ρ_p) é igual a 1.
- A distribuição da temperatura ao longo do corpo de prova foi considerada uniforme (condutividade térmica elevada);
- O fator de forma entre o corpo de prova e a vizinhança ($F_{C \rightarrow V}$) tende a 1, haja vista a instalação do sistema se dar em ambientes grandes e abertos;
- O corpo de prova é pintado de preto fosco, cuja a emissividade (ϵ) é ordinariamente admitida como 0,97 (ÇENGEL; GHAJAR, 2011);
- O tempo do experimento é rápido o suficiente para desconsiderar os efeitos convectivos na variação da angulação do corpo de prova;
- Não há vidro de cobertura no corpo de prova, logo não existe opacidade entre os raios refletidos e o absorvedor (τ_v é igual 1);
- Os ensaios experimentais são realizados em horário próximo ao zênite solar mantendo o corpo de prova praticamente na vertical.

Assim sendo, a Equação (3.11) foi simplificada para:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho V c_p} \left\{ \rho_p (1 - \rho_c) \gamma_i A_a G - A_{abs} \left[\epsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) + h (T - T_\infty) \right] \right\} \quad (3.12)$$

Pela Equação (2.15), considerando a simplificação de $\tau_v = 1$, e levando em consideração que $\alpha_{abs} = (1 - \rho_c)$ tem-se que:

$$\eta_o = \rho_p (1 - \rho_c) \gamma_i \quad (3.13)$$

Logo, a Equação (3.12) pode ser reescrita em:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho V c_p} \left\{ \eta_o A_a G - A_{abs} \left[\epsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) + h (T - T_\infty) \right] \right\} \quad (3.14)$$

Sem mbargo, a EDO representada pela Equação (3.14) pode ser resolvida numericamente aplicando as aproximações do Método de Euler para a derivada (dT/dt) conforme a Equação (3.15), o que resulta na Equação (3.16).

$$T_{n+1} = T_n + \Delta t \left. \frac{dT}{dt} \right|_n \quad (3.15)$$

$$T_{n+1} = T_n + \Delta t \left[\frac{1}{\rho V c_p} \left\{ \eta_o A_a G - A_{abs} \left[\epsilon \sigma (T_n^4 - T_\infty^4) + h (T_n - T_\infty) \right] \right\} \right] \quad (3.16)$$

A condição de contorno considerada foi a de $T(0)=T_\infty$ e o Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor Médio para a superfície externa do corpo de prova foi calculado pela Correlação de Churchill (Equação (3.17)) para a convecção natural em placas conforme cita Incropera e DeWitt (2014), que pode ser aproximada para cilindros desde que satisfaçam as seguintes condições:

$$\begin{aligned} Ra &\leq 10^9 \\ \frac{D}{L} &\geq \frac{35}{Gr_L^{1/4}} \end{aligned}$$

Logo as equações para a descrição da função térmica foram:

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,670 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0,492/Pr)^{9/6} \right]^{4/9}} \quad (3.17)$$

$$Ra_L = Gr_L Pr \quad (3.18)$$

$$Gr_L = \frac{g\beta(T - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (3.19)$$

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (3.20)$$

$$Pr = \frac{\mu c_{p-ar}}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.21)$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu_L} k}{L} \quad (3.22)$$

As propriedades físicas do ar podem ser representadas pelas expressões devidamente correlacionadas no Apêndice C.

Quando a convecção e a emissão da superfície do corpo de prova retiram calor à mesma taxa com que a radiação que chega ao corpo de prova, por reflexão ou refração, tem-se que a temperatura não mais varia com o tempo (estado estacionário):

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (3.23)$$

Nestas condições, a Equação (3.23) foi capaz de fornecer a temperatura máxima que um sistema de aquecimento alcançaria considerando as perdas de calor, ou seja, quando atingiu o estado de equilíbrio.

Sendo assim, a Equação (3.14) representa o modelo físico fenomenológico que descreve a variação da temperatura de um corpo de prova ao longo do tempo, o que possibilita a previsão de uma rampa de aquecimento. Para tanto, ela pode ser resolvida numericamente, permitindo ao usuário que informe diferentes tipos de radiação, temperatura ambiente e características do absorvedor.

Dois corpos de prova serviram como absorvedores cujo material utilizado foi o alumínio. Logo, a densidade e o calor específico adotados foram de 2702 kg.m^{-3} e $903 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, respectivamente (INCROPERA; DEWITT, 2014). O maior corpo de prova tinha 10,1 cm de diâmetro, 2,16 cm de espessura e massa de 449,87 g. Enquanto que o menor corpo de prova tinha 5,14 cm de diâmetro, 1,06 cm de espessura e 59,58 g.

3.2.3 Orientação do Coletor Solar

O rastreamento solar em concentradores de foco pontual mais adequado é o de dois eixos (DUFFIE; BECKMAN, 2013), o que pode ser feito por sensores ou por previsão numérica de posicionamento. A segunda opção, considera como guia a variação das coordenadas horizontais ou equatoriais, conforme mencionado na Seção 2.1.2, em função da latitude local, do dia do ano e do horário.

Para uma melhor orientação, considerou-se a automação do algoritmo elaborado por Schlyter (2014), no qual a precisão sugere um erro máximo de 2 min de arco e que é baseado nas seguintes hipóteses simplificadoras:

- As nutações (pequenas oscilações do eixo de rotação da Terra causadas pela força gravitacional da Lua) e aberrações (deflexões) foram ignoradas;
- As diferenças entre os tempos terrestre, universal e efemérides foram ignorados;
- A precessão (mudança no sentido do eixo de rotação) é calculada de forma simplificada, somando-se à longitude eclíptica;

Assim sendo, a escala de tempo adotada e os cálculos envolvendo os elementos orbitais são descritos a seguir.

Escala de Tempo

A escala de tempo adotada foi contada em dias. Horas, minutos e segundos foram expressos em fração sendo que o dia de origem, ou seja, igual a zero, foi equivalente a 0 de Janeiro de 2000 às 00:00 horas do Tempo Universal Coordenado (UTC). Esse sistema, segue o Tempo Civil e se baseia no Meridiano de Greenwich. O número do dia (ND) foi computado, conforme a Equação (3.24)

$$ND = 367y_i - \text{int} \left\{ \frac{7}{4} \left[y_i + \text{int} \left(\frac{m_i + 9}{12} \right) \right] \right\} + \text{int} \left(\frac{275m_i}{9} \right) + i - 730530 \quad (3.24)$$

Sendo y_i o ano, m_i o mês e i o dia do mês da data a ser analisada. A designação *int* solicita que seja considerado somente o número inteiro das frações correspondentes.

Elementos Orbitais

Os elementos orbitais de um corpo celeste são um conjunto de parâmetros que permitem definir a sua órbita, de forma unívoca, em torno de qualquer outro corpo celeste. Segundo Schlyter (2014), entre a Terra e o Sol, os parâmetros orbitais podem ser expressos da seguinte forma:

$$\Omega_o = 0$$

$$i_o = 0$$

$$\omega_o = 282,9404 + 4,70935 \cdot 10^{-5} \text{ ND}$$

$$\alpha_o = 1$$

$$e_o = 0,016709 - 1,151 \cdot 10^{-9} \text{ ND}$$

$$M_o = 356,0470 + 0,9856002585 \text{ ND}$$

Os seis parâmetros são conhecidos como: longitude do nó ascendente (Ω_o), inclinação orbital (i_o), argumento de periélio (ω_o), semieixo maior da órbita (α_o), excentricidade da órbita (e_o) e anomalia média de um período (M_o). Com eles, é possível calcular a obliquidade da eclíptica (θ_{ecl}), Equação (3.25), e a longitude média do Sol ($\overline{L_o}$), Equação (3.26), ambas em graus.

$$\theta_{ecl} = 23,4393 - 3,563 \cdot 10^{-7} \text{ ND} \quad (3.25)$$

$$\overline{L_o} = \omega_o + M_o \quad (3.26)$$

A Equação (3.27), calcula a anomalia excêntrica (E_o), também em graus.

$$E_o = M_o + \frac{180}{\pi} e_o \sin(M_o) [1 + e_o \cos(M_o)] \quad (3.27)$$

As Equações (3.28) e (3.29) dão as coordenadas retangulares do Sol no plano da eclíptica, sendo o eixo x relacionado com o periélio.

$$x_o = \cos(E_o) - e_o \quad (3.28)$$

$$y_o = \text{sen}(E_o) \sqrt{1 - e_o^2} \quad (3.29)$$

Convertendo as coordenadas em distância (r_o) e anomalia verdadeira (v_o):

$$r_o = \sqrt{x_o^2 + y_o^2} \quad (3.30)$$

$$v_o = \text{arctg } 2(y_o, x_o) \quad (3.31)$$

A função aqui denominada **arctg 2** direciona o par de coordenadas para o correto ângulo, em qualquer um dos quatro quadrantes. Para isto, ela deve ser resolvida conforme o Apêndice A.2. É possível calcular agora a longitude verdadeira do Sol, (L_o) pela Equação (3.32).

$$L_o = v_o + \omega_o \quad (3.32)$$

Assim, torna-se possível calcular as coordenadas retangulares eclípticas do Sol, com as Equações (3.33), (3.34) e (3.36).

$$x_o = r \cos(L_o) \quad (3.33)$$

$$y_o = r \text{sen}(L_o) \quad (3.34)$$

$$z_o = 0 \quad (3.35)$$

Conquanto, para o cálculo da Ascensão Reta (AR) e da Declinação (DEC) é preciso rotacioná-las para coordenadas equatoriais, Equações (3.36), (3.37) e (3.38).

$$x_e = x_o \quad (3.36)$$

$$y_e = y_o \cos(o_{ecl}) - z_o \text{sen}(o_{ecl}) \quad (3.37)$$

$$z_e = y_o \operatorname{sen}(o_{ecl}) + z_o \cos(o_{ecl}) \quad (3.38)$$

Finalmente, as Equações (3.39) e (3.40), que também seguem a função do Apêndice A.2, fornecem as duas informações necessárias para o rastreamento solar.

$$RA = \arctg 2(x_e, y_e) \quad (3.39)$$

$$DEC = \arctg 2\left(z_e, \sqrt{x_e^2 + y_e^2}\right) \quad (3.40)$$

3.3 Metodologia Experimental

Este trabalho teve natureza experimental e qualitativa. Os resultados experimentais foram coletados para a caracterização do sistema de aquecimento e condensação e foram feitos conforme as seguintes etapas: parametrização, preparação da solução, montagem da unidade experimental, apontamento e aquisição de informações sobre a dessalinização.

3.3.1 Parametrização

Os parâmetros de caracterização adotados foram os mesmos propostos por Garg e Prakash (2000), na Seção 2.2.1. Os dados da radiação incidida no absorvedor foram obtidos através de um piranômetro instalado na unidade rastreadora, cujas especificações são descritas na seção de instrumentação.

A curvatura da parábola foi determinada utilizando dois instrumentos de medição, uma trena e um paquímetro, orientados ao longo dos eixos x, y e z da superfície. Também por medição, foram determinadas as áreas de abertura do topo do concentrador (A_a) e a área superficial dos absorvedores (A_{abs}) utilizados para os experimentos. Logo, o índice de concentração (C) foi calculado pela Equação (2.12).

Conhecida a curvatura, a determinação da distância focal foi feita matematicamente e visualmente através do deslocamento do absorvedor ao longo do eixo perpendicular à superfície refletora. Os outros parâmetros foram estabelecidos conforme os procedimentos a seguir.

Ângulo Limite

O ângulo limite foi determinado de duas formas: por traçados geométricos via desenho assistido por computador, ou *Computer Aided Design* (CAD), e experimentalmente. Neste último caso, o rastreador, com o foco centralizado no absorvedor, foi movimentado horizontalmente até que o feixe luminoso se encontrasse na extremidade do absorvedor. O ângulo desse deslocamento foi identificado pelo *software Syscan*, acoplado ao rastreador.

Ângulo de Borda

O ângulo de borda pôde ser calculado pela Equação (2.11). No entanto, essa equação somente é válida para curvaturas parabólicas nas quais o centro do absorvedor esteja instalado exatamente na distância focal proposta pela curvatura, o que não foi o caso. Assim sendo, o ângulo de borda foi determinado por traçados geométricos via CAD.

Fator de Interceptação

As áreas úteis das superfícies refletora e refratora foram avaliadas experimentalmente cobrindo-as completamente com tiras verticais de fita adesiva preta. Depois de apontar o concentrador para o Sol, com o sistema de rastreamento ligado, as fitas, de 1,9 cm de largura, foram retiradas individualmente. Conforme os raios solares atingiam o absorvedor, que foi dividido em classes de cores concêntricas e com escala em centímetros, tal qual ilustrado na Figura 3.3, identificava-se na superfície da parábola ou da Lente de Fresnel a mesma cor que atuava no disco absorvedor. A tonalidade cinza foi o indicativo de que os raios solares não atingiram o absorvedor.

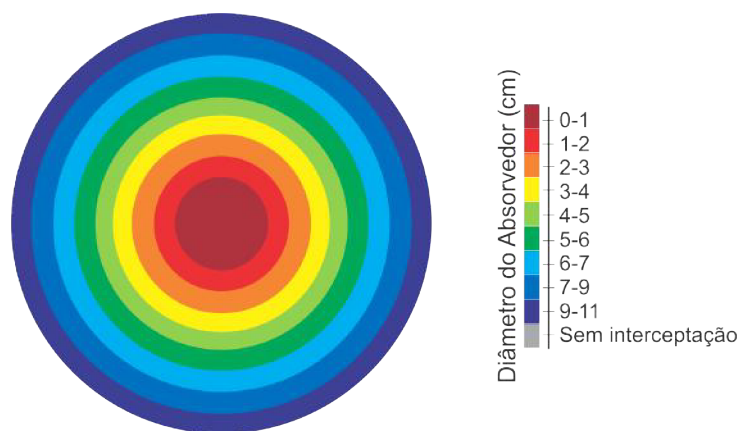


Figura 3.3: Subdivisão do disco absorvedor.

Eficiência Óptica

A eficiência óptica foi calculada pela Equação (2.15), considerando os dados de refletividade, absortividade e transmissividade dos materiais utilizados e o fator de interceptação determinado conforme descrição anterior.

Dinâmica de Aquecimento

O experimento da dinâmica de aquecimento foi realizado a fim de se determinar a rampa de aquecimento, a temperatura máxima dos concentradores e a eficiência térmica instantânea. Para isso, dois corpos de prova, no formato de disco, funcionaram como absorvedores dos raios solares. Cada um deles foi pintado de preto fosco e inseridos na região focal. Recapitulando, o maior corpo de prova tinha diâmetro de 10,11 cm, espessura de 2,16 cm e massa de 449,87 g. Já o menor corpo de prova, tinha 5,14 cm de diâmetro, espessura de 1,06 cm e massa de 59,58 g.

Um termopar do tipo K foi instalado no centro dos corpos de prova e as temperaturas foram registradas de minuto a minuto até que não houvesse variação significativa na temperatura. O tempo total do experimento foi de 3600 s para o maior corpo de prova e 1800 s para o menor corpo de prova.

Uma nova simulação foi proposta considerando os resultados da parametrização da unidade (área do topo que efetivamente contribuiu para o aquecimento do corpo de prova). Logo, foi possível compará-la com os testes experimentais e determinar a eficiência térmica instantânea.

3.3.2 Preparação da Solução

A solução de água com sal marinho (Tabela 3.2) foi preparada utilizando uma balança de precisão considerando os percentuais em massa. Cinco concentrações foram preparadas, 0%, 1%, 2%, 3%, e 4% dos sais. No entanto, os experimentos foram conduzidos de duas formas.

Na primeira delas, o evaporador foi alimentado continuamente pela solução preparada, o que gerava um aumento na concentração de sais ao longo dos experimentos de dessalinização. Na outra forma, a solução a ser estudada foi inserida inicialmente no evaporador, mas a alimentação durante os experimentos foi realizada por água sem adição de sais, com o objetivo de se analisar os efeitos da concentração salina sobre a produtividade de água potável.

Tabela 3.2: Características do sal marinho conforme o fabricante.

Características Físico-Químicas	Resultado Máximo	Típico
Umidade (H ₂ O)	3,0%	2,5%
NaCl (Base Seca)	99,55% (mínimo)	99,71%
Resíduos Insolúveis	0,1%	0,08%
Cálcio	0,07%	0,04%
Magnésio	0,05%	0,03%
Sulfato (calculado)	0,23%	0,14%
Turbidez Visual	Claro	Claro

3.3.3 Montagem da Unidade Experimental

Os concentradores solares e a unidade rastreadora tinham instalação determinada, mas não fixa. Por isso, eles foram montados na área externa da FEQUI/UFU a cada medição obedecendo aos critérios de balanceamento, alinhamento e apontamento. Ao final de cada experimento, eles eram desmontados.

Balanceamento

O balanceamento de peso de todos os componentes e acessórios permitiu um controle preciso de micro-regulação e redução do *stress* na montagem do concentrador. Isso foi feito nos sentidos dos eixos da Ascensão Reta e da Declinação.

Os seguintes procedimentos foram adotados. Primeiro, balanceava-se o equipamento no sentido da Ascensão Reta, certificando que o equipamento estivesse nivelado e ajustado a uma altitude de montagem entre 15° e 30°. Os eixos da Declinação e da Ascensão Reta foram destravados e movidos até que a haste do contrapeso e a unidade concentradora estivesse na horizontal, ou seja, de forma paralela ao solo, conforme ilustrado na Figura 3.4. Neste momento, travava-se o eixo da Declinação e os contrapesos eram movidos até que o sistema ficasse estático quando solto. Por último, travava-se a haste do contrapeso.

O balanceamento do equipamento no eixo da Declinação foi feito ajustando o ângulo da altitude entre 60° e 75°. Logo após, soltava-se a trava da Ascensão Reta de modo que a haste do contrapeso estivesse em uma posição horizontal, travando-a em seguida. O eixo da Declinação era destravado e movido até que ficasse paralelo ao chão. Lentamente a unidade era solta e a base era deslizada, para frente ou para trás, até que se atingisse o equilíbrio. Finalmente, a unidade voltava a sua posição de origem, ou seja, com o eixo da altitude redefinido para a latitude local e apontada para o Sul.

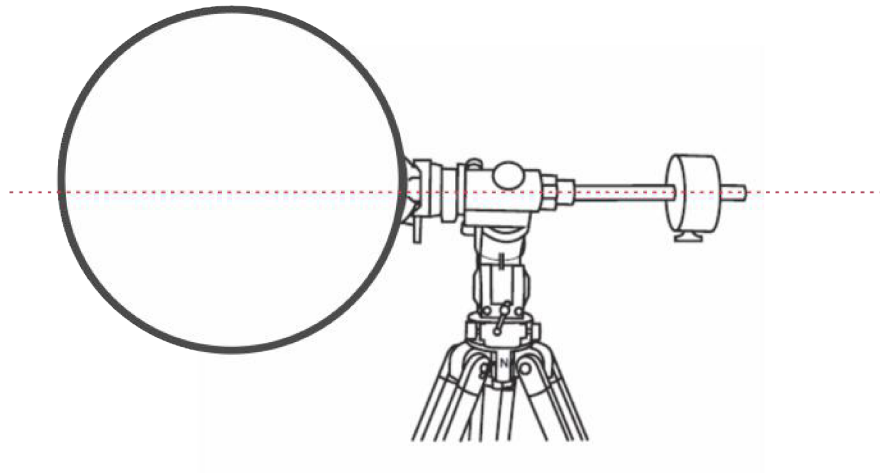


Figura 3.4: Balanceamento do eixo da ascensão reta.

Alinhamento

O alinhamento da unidade rastreadora foi feito apontando a base principal do tripé (indicada pela letra **N**) no sentido do Sul Geográfico, ou verdadeiro. Para adquirir tal informação, utilizava-se uma bússola indicadora do Polo Norte Magnético e fazia-se a correção da declinação magnética (δ_m). Em caso de declinação negativa, o sentido de correção é horário, se for positiva, a correção se dá no sentido anti-horário, conforme ilustrado na Figura 3.5.

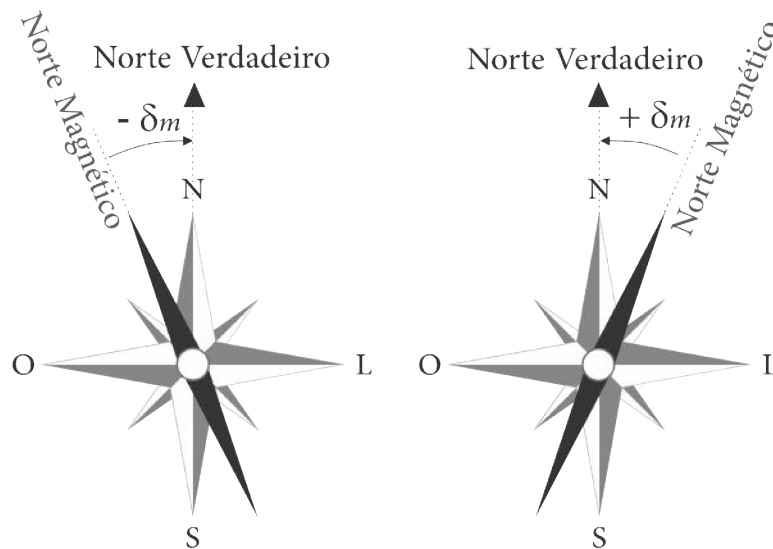


Figura 3.5: Correção do polo norte verdadeiro por declinação magnética.

Os valores da declinação magnética podem ser adquiridos em referências cartográficas, tal qual a apresentada no Apêndice D, ou através de calculadoras como a disponibilizada por NOAA (2015), para os modelos *World Magnetic Model* (WMM) e *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF).

3.3.4 Apontamento Inicial

O apontamento inicial da unidade rastreadora foi feito inserindo as informações locais da latitude e longitude, o dia e o horário local com o fuso horário. A solução das Equações (3.39) e (3.40) possibilitaram esse direcionamento. Logo em seguida, a unidade foi ajustada para trabalhar com uma velocidade de rastreamento à taxa solar, seguindo as informações do Horário Solar da Seção 2.1.2.

3.3.5 Dessalinização

O sistema de aquecimento foi composto por dois coletores solares distintos, um tripé rastreador, uma bomba peristáltica dosadora (modelo Instrutherm BP-1000), calibrada conforme manual, e por dois tanques de armazenamento com capacidade total de 2 L.

A obtenção dos resultados de temperatura foi feito através de termopares do tipo K, inseridos conforme a numeração da Figura 3.6 e ligados em um painel digital. O primeiro, media a temperatura do tanque de armazenamento de água salobra ou salgada. O segundo media a temperatura do fluido no evaporador (absorvedor), o terceiro mensurava a temperatura do condensado após passar pelo tubo de cobre retorcido e o quarto media a temperatura do fluido depois da tubulação de silicone, ou seja, assim que chegava ao tanque de armazenamento de água destilada. Assim foi possível determinar o rendimento do condensador em termos de eficiência (η_r) à partir das temperaturas de entrada (T_o) e de saída (T_f) dos trechos do condensador, conforme o seguinte equacionamento:

$$\eta_r = 1 - \frac{T_f}{T_o} \quad (3.41)$$

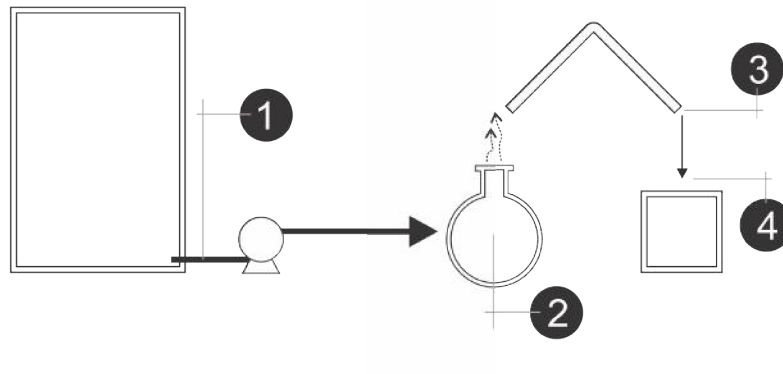


Figura 3.6: Distribuição dos termopares no sistema para medida de temperatura.

As leituras foram realizadas manualmente em dois períodos, no instante do aqueci-

mento do fluido, de minuto em minuto, e ao chegar a temperatura de equilíbrio, com uma frequência de 15 em 15 minutos. O intervalo de medição foi das 09:00 até as 16:00 horas, horário de Brasília-DF. Os dados atmosféricos foram adquiridos através de um piranômetro portátil modelo MES-200, anexado à unidade concentradora, com resposta espectral entre 400 nm e 1000 nm.

Na caracterização do equipamento, considerando a concentração do líquido do evaporador variável, foi analisado o funcionamento do sistema de destilação alimentado pelas 5 concentrações de sal marinho, descritas no item 3.3.2. Investigou-se também, o rendimento do sistema de condensação ao longo do dia. Logo, ao final de cada experimento, o destilado era pesado e a concentração de sais era determinada através de um condutivímetro, para verificar se havia ou não arraste do soluto.

Para os testes baseados no planejamento fatorial, descrito a seguir, a concentração de solução era fixa no evaporador. Assim como no caso anterior, após cada experimento, a água destilada foi drenada do sistema e pesada em uma balança de precisão.

3.3.6 Planejamento Fatorial 3^2

Um tratamento estatístico do tipo planejamento fatorial (PF) foi realizado para verificar a significância e a confiabilidade dos experimentos. Adotou-se um teste de hipótese *t-Student* com área de rejeição de 10%. Isto posto, para otimização, utilizou-se das técnicas da superfície de respostas (RYAN, 2011).

O PF considerado a três níveis e com duas variáveis (3^2), sendo que uma delas foi a concentração de sal marinho na solução (Θ) e a outra foi carga mássica da solução (C_m) inserida no absorvedor. No total, nove experimentos foram necessários tendo como resposta a produção de água dessalinizada. Os cálculos foram realizados através do *software* Statistica, versão 10, da Statsoft. Desta maneira, as variáveis foram codificadas conforme a Equação (3.42).

$$X_n = \frac{X - X_0}{\left(\frac{X_{+1} - X_{-1}}{2}\right)} \quad (3.42)$$

Em que X_n é o valor codificado da variável, X é o valor da variável a ser calculada, X_0 é o valor da variável no ponto central, X_{+1} é o valor da variável no nível superior e X_{-1} é o valor da variável no nível inferior. Os níveis superiores (+1) das variáveis escolhidas foram uma concentração de sais de 4% e uma carga de solução de 80 g, essa última estabelecida como o nível máximo para que não houvesse arraste de sais na água destilada. Os níveis

inferiores (-1) foram uma concentração de 0% de sais e uma carga de 20 g de solução, o suficiente para cobrir aproximadamente 22 g de basalto britado. Assim, as variáveis tornam-se:

$$X_1 = \frac{\Theta (\%) - 2}{2} \quad (3.43)$$

$$X_2 = \frac{C_m (g) - 50}{30} \quad (3.44)$$

Portanto, a Equação (3.45), faz referência à correlação empírica de segunda ordem que representa as respostas estudadas.

$$P = \beta_0 + [\alpha_1 \ \alpha_2] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + [X_1 \ X_2] \begin{bmatrix} \beta_{11} & \frac{\beta_{12}}{2} \\ \frac{\beta_{12}}{2} & \beta_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Sendo que β_0 é o valor médio da resposta, α_1 , α_2 , β_{11} , β_{22} e β_{12} são os parâmetros da equação e X_1 e X_2 são concentração e carga, respectivamente. A matriz de planejamento fatorial é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Matriz de Planejamento.

Experimento	X_1	X_2
1	0 (-1)	20 (-1)
2	2 (0)	20 (-1)
3	4 (+1)	20 (-1)
4	0 (-1)	50 (0)
5	2 (0)	50 (0)
6	4 (+1)	50 (0)
7	0 (-1)	80 (+1)
8	2 (0)	80 (+1)
9	4 (+1)	80 (+1)

3.4 Materiais

A unidade de aquecimento solar foi separada em três partes distintas: o sistema de rastreamento, o concentrador solar de disco e o concentrador solar por Lente de Fresnel, as fotos são apresentadas no Apêndice E. A seguir, serão descritas cada uma delas.

3.4.1 Sistema de Rastreamento

A unidade de rastreamento foi adaptada de uma montagem equatorial com fins astrofotográficos, conforme Figura 3.7. Foi composta por um tripé de aço inoxidável (1) responsável por sustentar um rastreador de dois eixos (2) do tipo equatorial alimentado por dois motores. Cada um deles, com passo de $1,8^\circ$ de ângulo e 64 passos por volta, tinha uma precisão de posicionamento de até 1 arco-minuto. Sua capacidade de carga foi de aproximadamente 13 kg sendo alimentado por 12 V.

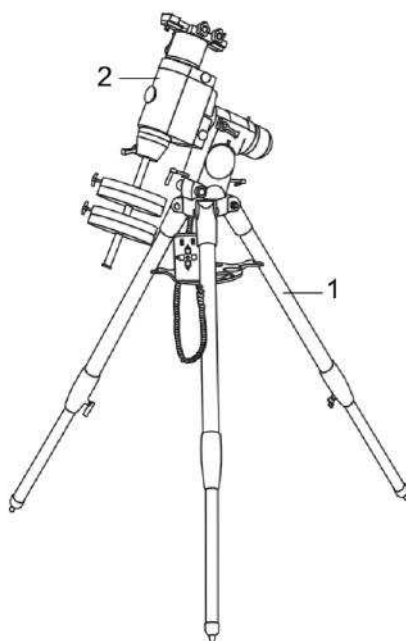


Figura 3.7: Sistema de rastreamento equatorial, adaptado do manual do equipamento.

O sistema de ajuste angular para o balanceamento foi feito de manualmente nos sentidos azimutal e da latitude. Possuía um trilho deslizante e uma haste móvel responsável por posicionar o contrapeso para o balanceamento de cargas. O direcionamento dos eixos de Declinação e da Ascensão Reta era automatizado, embora houvesse a opção de direcionamento manual. O equipamento pôde ser controlado *in loco* ou remotamente através de um sistema de interface.

3.4.2 Sistema Concentrador por Disco Cromado

A unidade de concentração solar de disco foi construída em uma base de metalon, parafusada nos trilhos do rastreador. Ela era móvel e possuía um contrapeso anexado. O disco côncavo, de aço galvanizado, possuía altura de 68 cm e largura de 62 cm e foi adaptado de uma antena parabólica fechada. A superfície refletora foi espelhada em um

processo de cromagem eletrostática que iniciou-se pela lavagem, desengraxe, decapagem e ativação do disco. Logo em seguida, a peça recebeu um banho de cobre e outro de níquel, para finalmente receber o banho de cromo, o que permitiu o espelhamento.

O absorvedor, de vidro temperado, foi pintado com tinta preta fosca para altas temperaturas e posicionado na região focal do disco, sua capacidade de armazenagem era de 100 mL. Um mecanismo de contrapeso, no mesmo eixo do absorvedor, mantinha-o verticalmente alinhado o que facilitava o direcionamento do líquido evaporado. Um tubo de cobre servia como condensador e era acoplado por mangueiras de silicone. O tubo, tinha diâmetro de 1/4" e 30 cm de comprimento com retorção angular de aproximadamente 45°. Todo o líquido condensado era armazenado em um recipiente transparente e graduado.

3.4.3 Sistema Concentrador por Lente de Fresnel

A unidade de concentração solar foi construída em uma base de metalon parafusada nos trilhos do rastreador. A Lente de Fresnel, de acrílico, tinha 31 cm de altura, 31 cm de largura e 0,4 cm de espessura, com 4 chanfros de 4,0 cm. A lente utilizada foi reaproveitada de um retroprojektor. O absorvedor, de vidro policarbonato, foi pintado com tinta preta fosca para altas temperaturas e posicionado na região focal da lente. Possuía 1,3 cm de diâmetro e altura de 3,1 cm, sua capacidade de armazenamento era de aproximadamente 4 mL. Assim como no concentrador solar de disco, havia um eixo comum entre o absorvedor e um contrapeso com o objetivo de alinhamento vertical.

O sistema de condensação foi praticamente o mesmo utilizado na unidade de disco, diferenciando apenas pela conexão entre o absorvedor e o tubo de cobre e pelo tamanho do recipiente de armazenamento do líquido condensado. Assim, o fluxograma da dessalinização é apresentado pela Figura 3.8 considerando a Lente de Fresnel como concentrador solar. Logo, a água salgada ou salobra foi captada de um tanque pulmão (1) e bombeada para um evaporador que funcionou como absorvedor (3).

O concentrador solar de Lente de Fresnel (2) captava os raios solares e, através da refração, convergia-os para um ponto focal. A água salgada aquecia e evaporava sendo agora isenta de sais e esterilizada. Por fim, um tubo de cobre e outro de silicone (4) condensava a água dessalinizada e direcionava-a para um recipiente de armazenamento. O fluxo foi o mesmo para o concentrador solar de disco, considerando apenas o efeito da reflexão, ao invés da refração, dos raios solares.

Para fins de registro, na Tabela 3.4 é fornecida a precisão dos instrumentos de medição utilizados para os experimentos nos concentradores solares disco e de Lente de Fresnel.

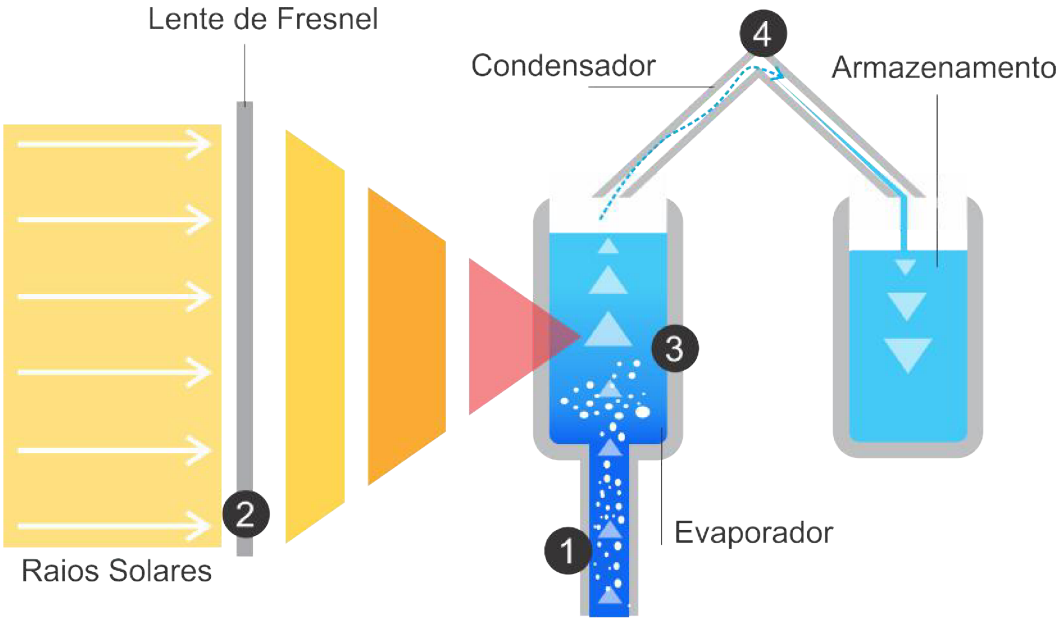


Figura 3.8: Fluxograma de produção do CSLF.

Tabela 3.4: Instrumentos de medição

Instrumento	Modelo	Precisão	Faixa
Balança	Shimadzu UX4200H	0,01 g	0,50 - 4200,00 g
Condutivímetro	TEC-4MPP	0,001 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$	0,000 - 200000,000 $\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$
Termopar	PT-100	0,01°C	-50,00 - 199,99°C
Piranômetro	MES-200	0,1 $\text{W}.\text{m}^{-2}$	0,0 - 2000,0 $\text{W}.\text{m}^{-2}$
Bomba Dosadora	DMC-100	0,01 $\text{mL}.\text{min}^{-1}$	0,00 - 4000,00 $\text{mL}.\text{min}^{-1}$
Termopar	Tipo K - NiCr	0,1°C	0,0 - 1250,0°C

O presente capítulo fez um relato dos materiais, equipamentos e metodologias empregadas nesse trabalho. O capítulo seguinte apresentará os principais resultados e a discussão envolvida no planejamento, construção e caracterização dos equipamentos.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

O capítulo anterior apresentou a metodologia e os materiais utilizados nesse trabalho descrevendo também a instrumentação de referência para as medições. Já este capítulo apresenta os resultados do trabalho descrevendo os detalhes da construção e a caracterização dos concentradores e evaporadores solares. Os resultados foram analisados de forma quantitativa no que se refere ao perfil geométrico, e qualitativa no que envolvia a meteorologia, devido à impossibilidade de reprodução das mesmas condições e comportamentos físicos da atmosfera.

A primeira parte deste capítulo apresenta o planejamento e a construção da unidade experimental subdividida em três temas: a definição da curvatura, baseada na quantificação ideal do fator de interceptação, a previsão da dinâmica de aquecimento, considerando valores ideais de absorção e de reflexão e, por fim, a elaboração do protótipo que discute as dificuldades encontradas nos experimentos e as soluções tecnológicas implementadas. A segunda parte trata dos resultados experimentais descrevendo os parâmetros de caracterização dos concentradores, os experimentos envolvendo a dessalinização e o planejamento fatorial que investiga os efeitos das variações da concentração de sal marinho e da carga mássica na solução.

4.1 Planejamento e Construção da Unidade

A construção dos protótipos de concentradores solares instalados na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU), foi um dos resultados desta Tese. No entanto, para sua efetiva construção, foi necessário definir,

dentre inúmeras possibilidades, quais as dimensões geométricas mais adequadas para as partes acessórias desse concentrador. Para esse fim, foi feito um estudo teórico preliminar envolvendo conceitos de óptica geométrica e de transferência de calor para fundamentar e auxiliar na tomada de decisão.

4.1.1 Definição da Curvatura da Calha

As figuras apresentadas nesta seção possuem linhas na cor azul que representam os raios da luz solar incidentes e linhas na cor vermelha que representam os raios refletidos pela superfície espelhada em cada ponto de incidência. A incidência dos raios foi considerada sempre paralela ao eixo das ordenadas. Para facilitar a visualização gráfica, os raios refletidos tiveram a sua projeção interrompida quando eles cruzavam o eixo das ordenadas sem interceptar o absorvedor.

Superfície Refletora Plana

A primeira configuração geométrica a ser analisada foi baseada em dois espelhos planos com angulação de 60° em relação a uma base horizontal e inspirados no modelo de Szokolay (1979). Recapitulando, o comprimento dos espelhos inclinados mediam $1/4$ da abertura cada um e o plano horizontal media $1/2$ da abertura, ou seja, 1 m. Mesmo que essa superfície não seja uma curvatura, ela é capaz de direcionar os raios solares para uma região específica do absorvedor, mas não forma uma imagem pontual ou linear.

Por isso, percebeu-se que a instalação do absorvedor proposto, no formato circunferencial e com 2" de diâmetro, não obteve rendimento significativo, o que pôde ser visualizado pela Figura 4.1. A captação da incidência dos raios solares nessa configuração correspondeu a um fator de interceptação de 7,62%.

Já a Figura 4.2, apresenta a simulação numérica do deslocamento do absorvedor ao longo do eixo y e o fator de interceptação correspondente a este local. Foi possível perceber que na região de atuação dos raios refletidos a interceptação foi praticamente constante. Conquanto, ao sair dessa área, o absorvedor passou a receber somente a incidência direta dos raios solares, sem reflexão, o que justifica o indicativo de interceptação de cerca de 2,5%.

Para aproveitar o máximo do potencial desse concentrador seria necessário configurar o absorvedor em um formato plano que ocupasse toda a área do plano horizontal. Neste caso, o absorvedor receberia a incidência da irradiação solar correspondente a sua área, ou seja, a metade do comprimento da abertura, acrescidos de cada uma das áreas planas

inclinadas, o que resultaria na recepção de toda a área de abertura. Concentradores desse modelo são justificáveis quando o custo de se fabricar o absorvedor é maior do que o de se fabricar as superfícies espelhadas.

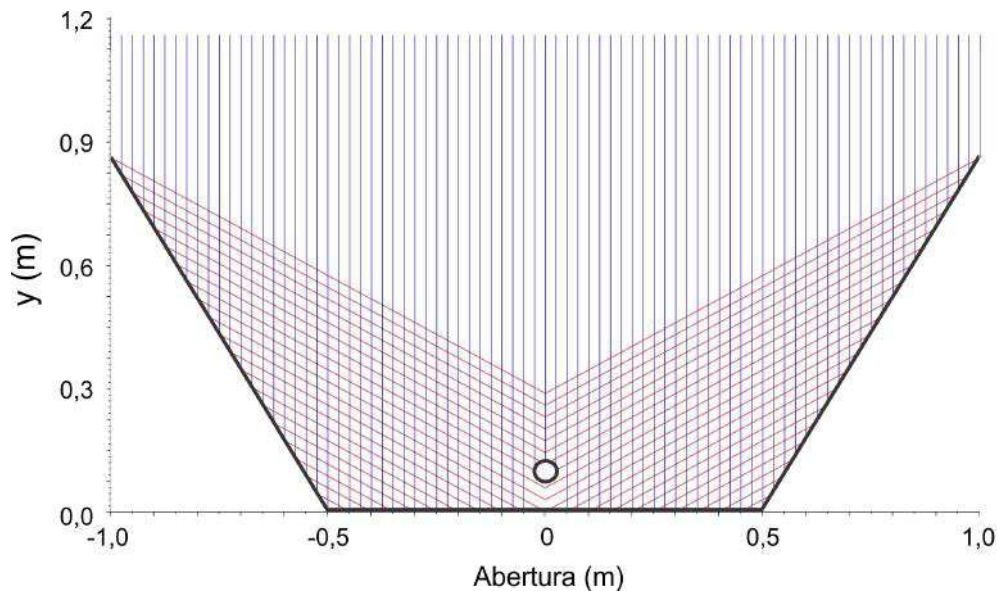


Figura 4.1: Incidência (em azul) e Reflexão (em vermelho) dos raios solares de um concentrador solar com planos inclinados a 60° , abertura=2 m.

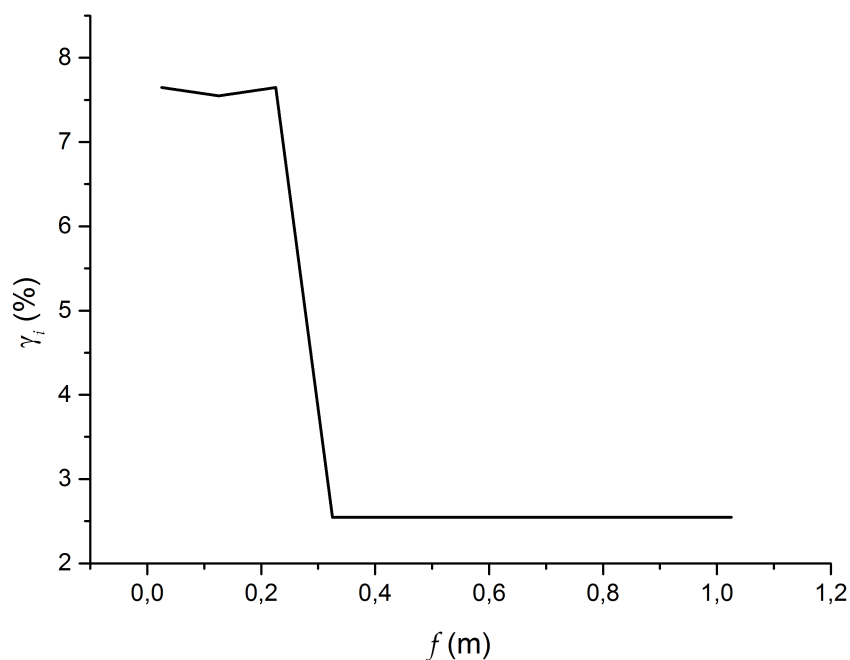


Figura 4.2: Medição do fator de interceptação (%), para uma superfície linear, deslocando o absorvedor ao longo do eixo y.

Superfície Refletora Circunferencial

Em seguida, foi analisado uma superfície refletora com função circunferencial, de raio 1,5 m, ilustrada na Figura 4.3. Neste caso, cerca de 72,57% dos raios incidentes foram refletidos no absorvedor localizado a 0,673 m. Notou-se que as extremidades dessa curvatura direcionam os raios solares abaixo da região focal de maior concentração.

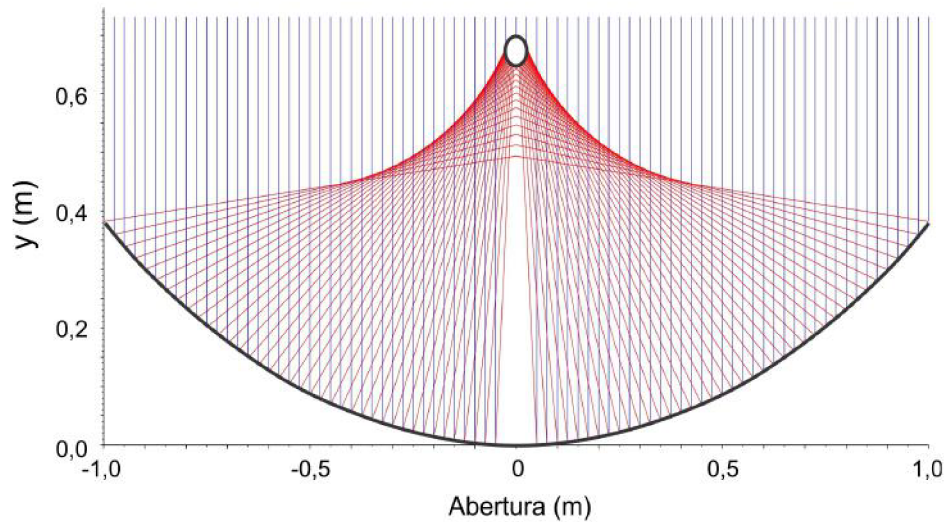


Figura 4.3: Projeção de raios solares incidentes (azul) e refletidos (vermelho) para uma calha com corte circunferencial e raio de curvatura equivalente a 1,5 m.

Por isso, investigou-se o deslocamento do absorvedor ao longo eixo y e o fator de interceptação correspondente a este local (Figura 4.4).

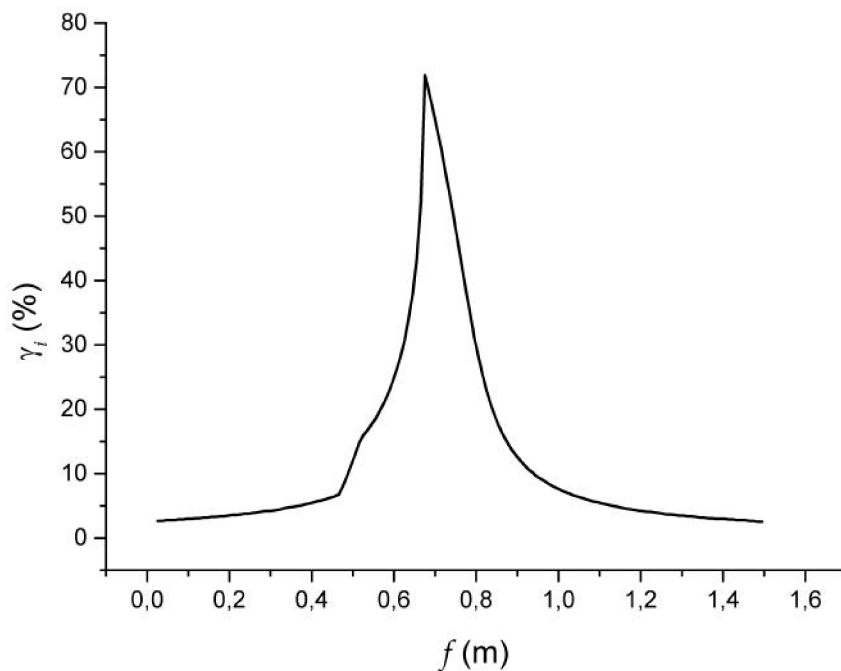


Figura 4.4: Medição do fator de interceptação (%) para uma superfície circunferencial.

Observou-se que a região de maior interceptação dos raios refletidos estava entre 0,67 e 0,72 m com concentrações maiores que 60%. Ao contrário do que ocorreu com a função linear, houve uma formação de imagem focal quando a função de concentração estabeleceu um ponto de máximo, estabelecido a 0,673 m.

Porém, a função circunferencial apresentou uma dispersão focal de aproximadamente 30% em uma região focal iniciada a partir de 0,49 m do eixo y. Essa dispersão foi oriunda das regiões próximas às bordas, nos limites entre 0,725 e 1,000 m, tanto pela direita (sinal positivo), quanto pela esquerda (sinal negativo) do centro da abertura da curvatura. Essa perda pode ser minimizada, ou até mesmo extinta, aumentando o raio da curvatura (ρ_f), conforme ilustra a Tabela 4.1. A partir de um raio de 2,4 m, o que representa 2,4 vezes a abertura, a região focal tende a um ponto focal, interceptando 100% dos raios refletidos.

Tabela 4.1: Fator de interceptação (γ_i) para superfícies circunferenciais em função do raio da curvatura.

ρ_f (m)	1,1	1,5	1,7	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4
f (m)	0,480	0,673	0,770	0,87	0,916	0,965	1,0134	1,0624	1,1114
γ_i (%)	58,22	72,57	79,25	84,85	88,76	91,75	94,88	97,80	100,00

Todavia, a utilização de curvaturas com maiores raios fez com que a localização do ponto focal (f) se distanciasse da base da calha, o que pode gerar gastos de construção mais acentuados e uma necessidade de uma maior área de instalação. Logo, para aproveitar a curvatura circunferencial com raios menores, pode-se posicionar o absorvedor de calor ao longo da região focal, ou seja, fixar sua linha axial de forma coincidente com o eixo das ordenadas.

Se a área do refletor for ainda insuficiente, para uma determinada utilidade, o tubo aquecedor poderia ser instalado em série, conforme Figura 4.5, até que a temperatura final do fluido atinja o patamar almejado.

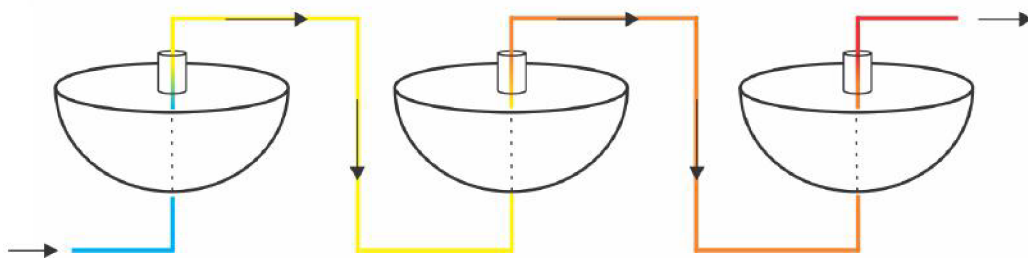


Figura 4.5: Instalação de concentradores solares esféricos em série.

Superfície Refletora Senoidal

A curva geradora equivalente à função senoidal também apresentou uma região focal, ilustrada na Figura 4.6. Neste caso, 79,28% dos raios incidentes foram refletidos no absorvedor localizado a 0,5454 m. Mas, ao contrário da superfície circunferencial, as extremidades dessa curvatura direcionaram os raios solares acima da região focal de maior concentração.

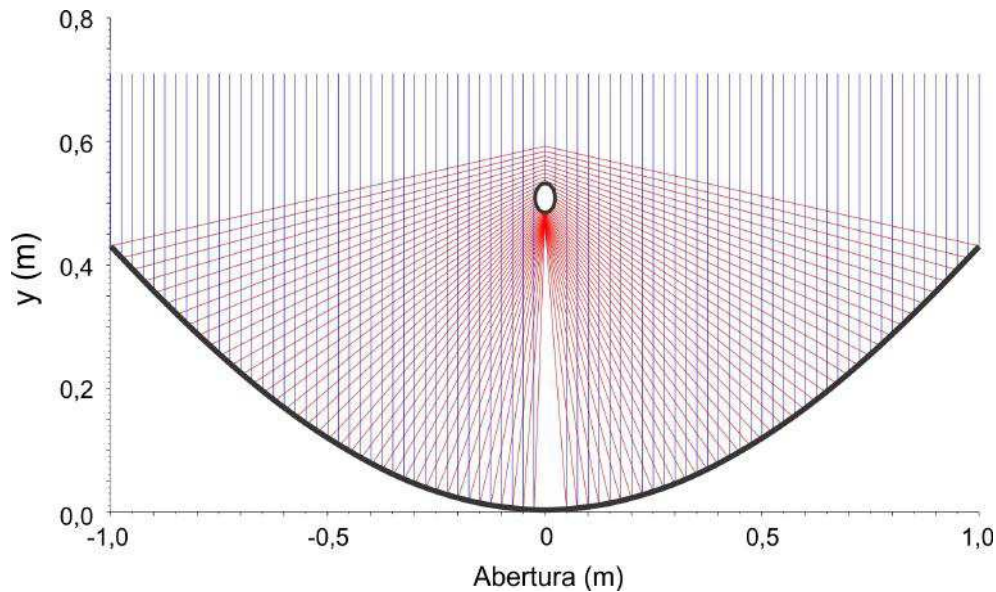


Figura 4.6: Projeção de raios solares incidentes (azul) e refletidos (vermelho) para uma calha com corte senoidal.

Assim sendo, pôde-se estudar o deslocamento do absorvedor pelo eixo y e o fator de interceptação correspondente a este local, Figura 4.7. Percebeu-se que a região de maior atuação dos raios refletidos estava localizada entre 0,51 e 0,56 m com concentrações maiores do que 60%. Contudo, seu ponto de máximo ocorreu a 0,5454, com uma tendência à formação de imagem focal.

Não obstante, a abertura da curvatura senoidal é feita pela diminuição do parâmetro γ_f resultando apenas em um distanciamento da região focal e não na formação de um ponto focal, como ocorreu com a função circunferencial. Se necessário utilizar esse tipo de curvatura, pode-se aumentar a capacidade de direcionamento dos raios solares inserindo uma segunda superfície refletora, na parte superior do absorvedor.

Superfície Refletora Parabólica

Feitas as considerações a respeito das funções geradoras linear, circunferencial e senoidal, seguem, agora, as informações da função geradora de natureza parabólica, ilustradas na Figura 4.8.

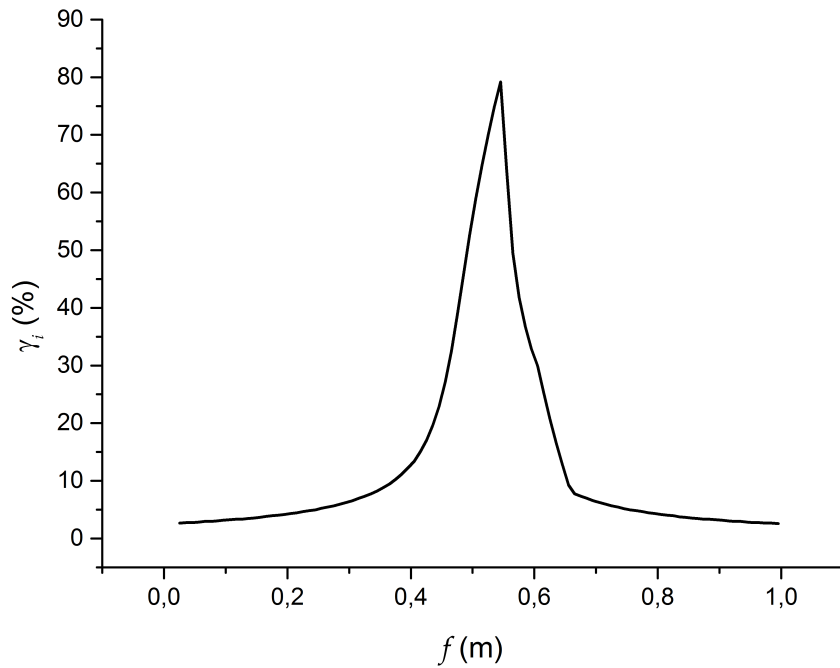


Figura 4.7: Medição de concentração dos raios solares (%), para superfície senoidal, deslocando o absorvedor ao longo do eixo y .

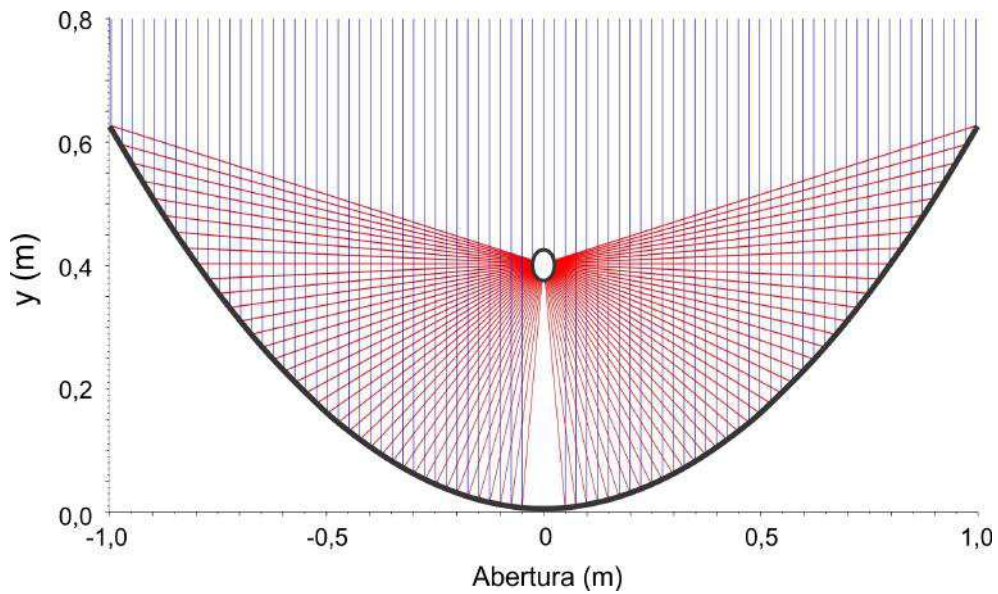


Figura 4.8: Projeção de raios solares incidentes (azul) e refletidos (vermelho) para uma calha com corte parabólico.

Nessa superfície, os raios solares foram completamente direcionados, não para uma região focal, mas para um ponto focal, que no caso, estabeleceu-se a 0,4 m. Portanto, a preferência por esse tipo de curvatura foi comprovado sem descartar as demais estudadas uma vez que existe a possibilidade de adaptação para um aproveitamento total dos raios solares.

4.1.2 Previsão da Dinâmica de Aquecimento

A proposta dessa simulação foi a previsão da temperatura de equilíbrio e a determinação da rampa de aquecimento de um absorvedor, na integralidade da reflexão e absorção dos raios solares. Para isso, foi considerado como referências dimensionais, a área de reflexão de uma parábola comercial, com fins de TV por satélite, espelhada, com 68 cm de altura e 62 cm de comprimento e dois absorvedores de alumínio, um com diâmetro de 10,11 cm e espessura de 2,16 cm e outro com o diâmetro de 5,16 cm e espessura de 1,06 cm.

Assim, para uma irradiação média de 800 W.m^{-2} e uma temperatura ambiente de 25°C , o absorvedor com diâmetro maior, linha contínua da Figura 4.9, atingiu uma temperatura de equilíbrio de $323,34^\circ\text{C}$ em 2692 s, determinada por um passo de integração de 10^{-4} . Nessas condições, a rampa de aquecimento foi de $7,20^\circ\text{C.min}^{-1}$. Sem embargo, a linha pontilhada da Figura 4.9, apresenta os dados da simulação com o absorvedor de menor tamanho. Nas mesmas condições, a temperatura de equilíbrio atingida foi de $595,77^\circ\text{C}$ em 651 s o que representou uma rampa de aquecimento de $54,90^\circ\text{C.min}^{-1}$.

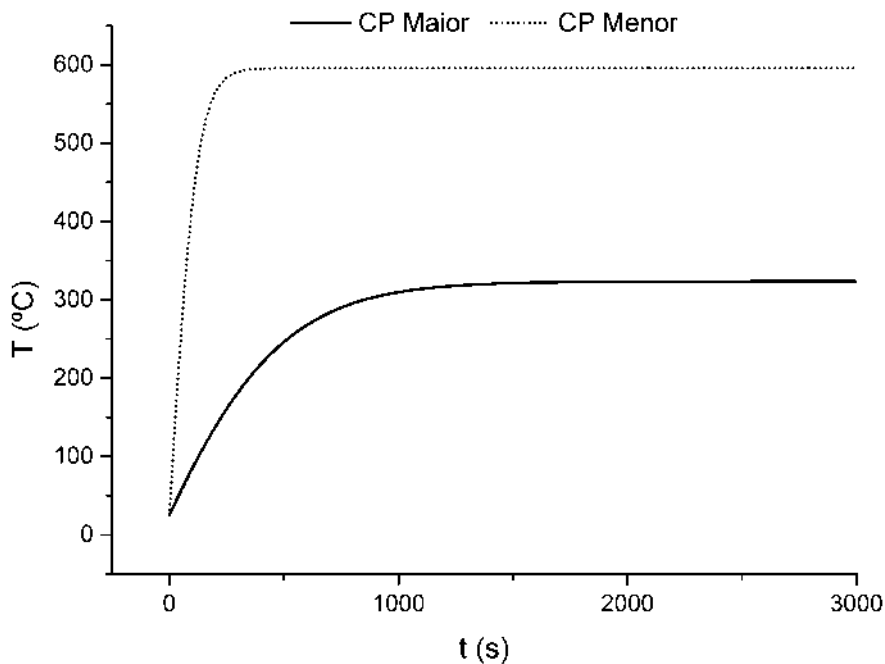


Figura 4.9: Simulação de aquecimento de uma parábola refletora com reflexão e absorção integral dos raios solares.

Em consequência, considerando as situações de idealidade, a parábola teve condições suficientes para o propósito de dessalinização que necessitam de um aquecimento constante próximo à 100°C .

4.1.3 Protótipo

Os protótipos foram construídos com base em estruturas já fundamentadas em outras utilidades, ou seja, trata-se de uma reconstrução utilitária. Desse modo, uma antena parabólica responsável pela captação de sinais de onda de rádio e televisão foi adaptada para concentrar os raios solares. Uma Lente de Fresnel que divergia um ponto de luz com o propósito de projeção de transparências passou a ser utilizada de forma contrária, concentrando a luz solar em um único ponto. Por fim, um tripé utilizado para registros astronômicos através da astrofotografia foi adequado para rastrear o movimento aparente do Sol. Os tópicos a seguir, tratam da caracterização dessas estruturas.

Concentrador Solar de Disco (CSD)

A unidade de concentração solar de disco, com base em uma antena parabólica, foi selecionada devido a uma maior possibilidade desse tipo de curvatura concentrar os raios solares. A antena foi espelhada através de um processo de cromação visando a uma maior precisão de concentração solar. Sem embargo, outros processos podem ser sugeridos tais como o envelopamento através de adesivos reflexivos, ou a adesão de espelhos planos, quadriculados, feitos de vidro ou até mesmo de acrílico, o que garantiria um menor peso da estrutura. Uma vista explodida do concentrador solar de disco é apresentada pela Figura 4.10

Essas partes permaneciam fixas no rastreador solar, mas havia ainda um tubo de silicone de 1,5 m, responsável por resfriar a água destilada e por direcioná-la até o recipiente de armazenamento, que também fazia parte da unidade. Antes de chegar a essa configuração outros modelos foram avaliados, sendo eles, uma parábola moldada com uma chapa de aço inoxidável 316 polida e por um revestimento de papel alumínio, ambos com problemas multifocais.

Também foram testados evaporadores, absorvedores de raios solares, que evoluíram em quatro etapas principais. Iniciando por um balão de vidro com fundo redondo, Figura 4.11-a, o qual apresentou dificuldades de medição de temperatura e funcionava apenas por batelada, seguido por um evaporador feito de tubo de cobre com entradas para o fluxo de água, Figura 4.11-b, com problemas de aquecimento e sem visibilidade do interior.

Em continuidade, foi avaliado um balão de fundo redondo com uma entrada compartilhada entre a alimentação da solução e o termopar, Figura 4.11-c, o qual apresentou problemas com o fluxo de alimentação da solução e também arraste de sal marinho na água destilada. Finalmente, o modelo considerado estável, foi o balão com fundo redondo de duas entradas, Figura 4.11-d. Nesta opção, houve uma independência entre as entradas

do termopar e da alimentação de água o que resolveu as obstruções do fluxo. O arraste de sal foi controlado pela inserção de 22 g basalto britado e pela definição de um nível alto de segurança, equivalente a 80 g de solução, que tornou referência para os experimentos do planejamento fatorial.

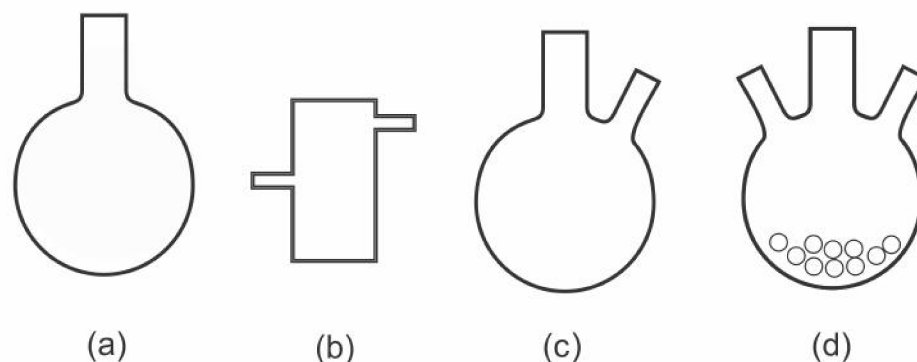


Figura 4.11: Evolução do evaporador, absorvedor dos raios solares, até chegar a configuração utilizada para os experimentos de dessalinização.

Além disso, o basalto possibilitou uma maior estabilidade diante das variações de irradiação, pois se mantinha aquecido. O balão de vidro foi pintando com tinta preta fosca, resistente até 600°C. Apenas a metade do balão de vidro foi pintado, na parte traseira, com o objetivo de aproveitar os benefícios da desinfecção por raios Ultravioleta e também para acompanhar o nível da solução.

Neste caso, o arraste de sal ao longo dos experimentos também ocorria devido a forma com que a montagem equatorial se movimentava. A escolha desse rastreador foi motivada pelas vantagens diante do modelo alto-azimutal no que diz respeito à redução do consumo energético e da suavidade de deslocamento, o que possibilita, no caso da astrofotografia, um maior conforto visual e uma fotografia sem rastros. Entretanto, considerando o rastreador solar equatorial como apoio para evaporação solar, o seu deslocamento de eixo atingia ângulos desfavoráveis para o absorvedor, ocasionando retorno de destilado (Figura 4.12-b) já que o vapor tendia a subir verticalmente, e/ou a contaminação da água destilada, de acordo com a Figura 4.12-c.

A solução adotada foi a instalação de um contrapeso que mantivesse o absorvedor sempre perpendicular ao solo (Figura 4.12-a). Ele foi projetado de maneira com que seu eixo estivesse no mesmo alinhamento do centro do absorvedor para que o foco permanecesse fixo, conforme ilustração da Figura 4.13 com as vistas traseira, lateral e frontal da estrutura do contrapeso. Os parafusos rosqueados tinham como função o ajuste fino do foco.

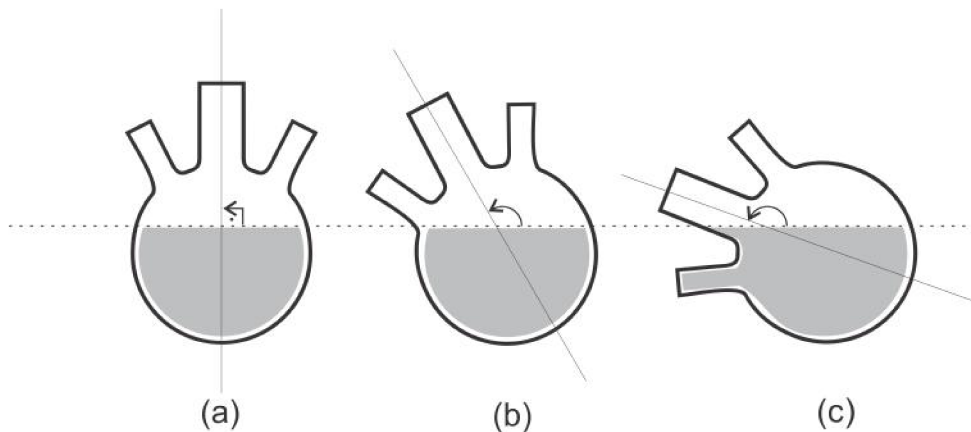


Figura 4.12: Posicionamento do líquido no absorvedor.

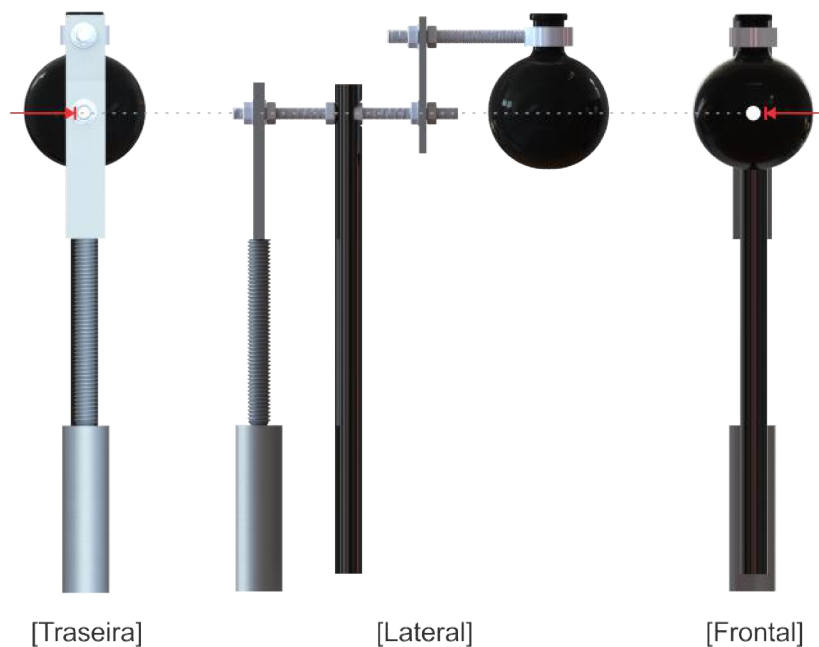


Figura 4.13: Alinhamento do eixo do contrapeso e do centro do absorvedor.

O modelo do condensador também evoluiu ao longo dos experimentos realizados. A Figura 4.14-a ilustra a primeira versão testada, composta por um condensador e um armazenador de destilado, ambos de vidro, que ficavam acoplados junto ao absorvedor na região focal. Nessa etapa, foi possível notar que a primeira contenção do destilado, no condensador, era suficiente para condensá-lo.

Logo, o sistema avançou para formato da Figura 4.14-b feita por um condensador de cobre tipo casco-tubo. Esse modelo, apesar de eficiente, ainda mantinha como inconvenientes: a fragilidade do armazenador, grandes perdas por sombreamento na parábola refletora e um peso excessivo na estrutura. Os testes seguintes separaram o recipiente de armazenamento e o absorvedor. Eles foram conectados por uma mangueira de silicone, que também exerceu a função de condensador.

Embora, apesar de condensar com eficiência, a mangueira conectada diretamente ao absorvedor tornava-se muito maleável ocasionando fuga de destilado. A inserção de um tubo de cobre curvado, Figura 4.14-c, simplificou o modelo e solucionou esse problema. A mangueira de silicone foi acoplada ao tubo de cobre e direcionava o condensado para um becker de boca alta, que funcionou como um recipiente de armazenamento de destilado, fixado na base do tripé rastreador.

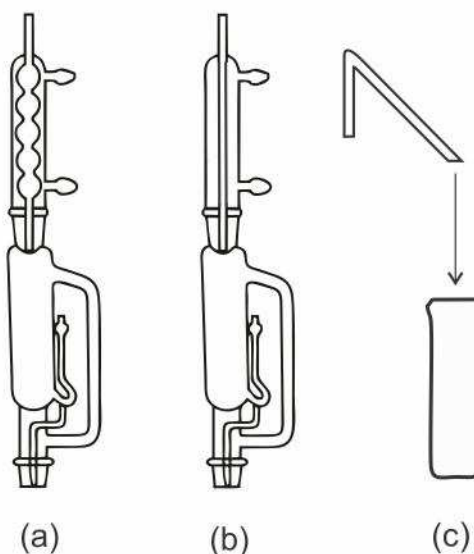


Figura 4.14: Evolução do condensador até chegar a configuração utilizada nos experimentos.

Concentrador Solar de Lente de Fresnel

O concentrador solar do tipo Lente de Fresnel, reaproveitado de um retroprojeto, foi selecionado devido a uma maior possibilidade dessa superfície concentrar os raios solares de forma pontual sem que houvesse deformação, uma vez que é originalmente projetado para trabalhar perto de uma luz incandescente que gera calor. Uma vista explodida do CSLF é ilustrada na Figura 4.15.

Assim como no caso do concentrador solar de disco, essas partes permaneciam fixas no rastreador solar. Entretanto, uma tubulação de silicone, móvel e flexível, funcionava como condensadora e direcionadora da água destilada para o recipiente de armazenamento. Em se tratando do evaporador, três etapas principais foram necessárias para sua concepção.

A primeira (Figura 4.16-a) foi a de um tubo de cobre o qual os experimentos indicaram uma baixa produtividade, sugerindo que a área de superfície do absorvedor fosse maior do que a capacidade de aquecimento do sistema.

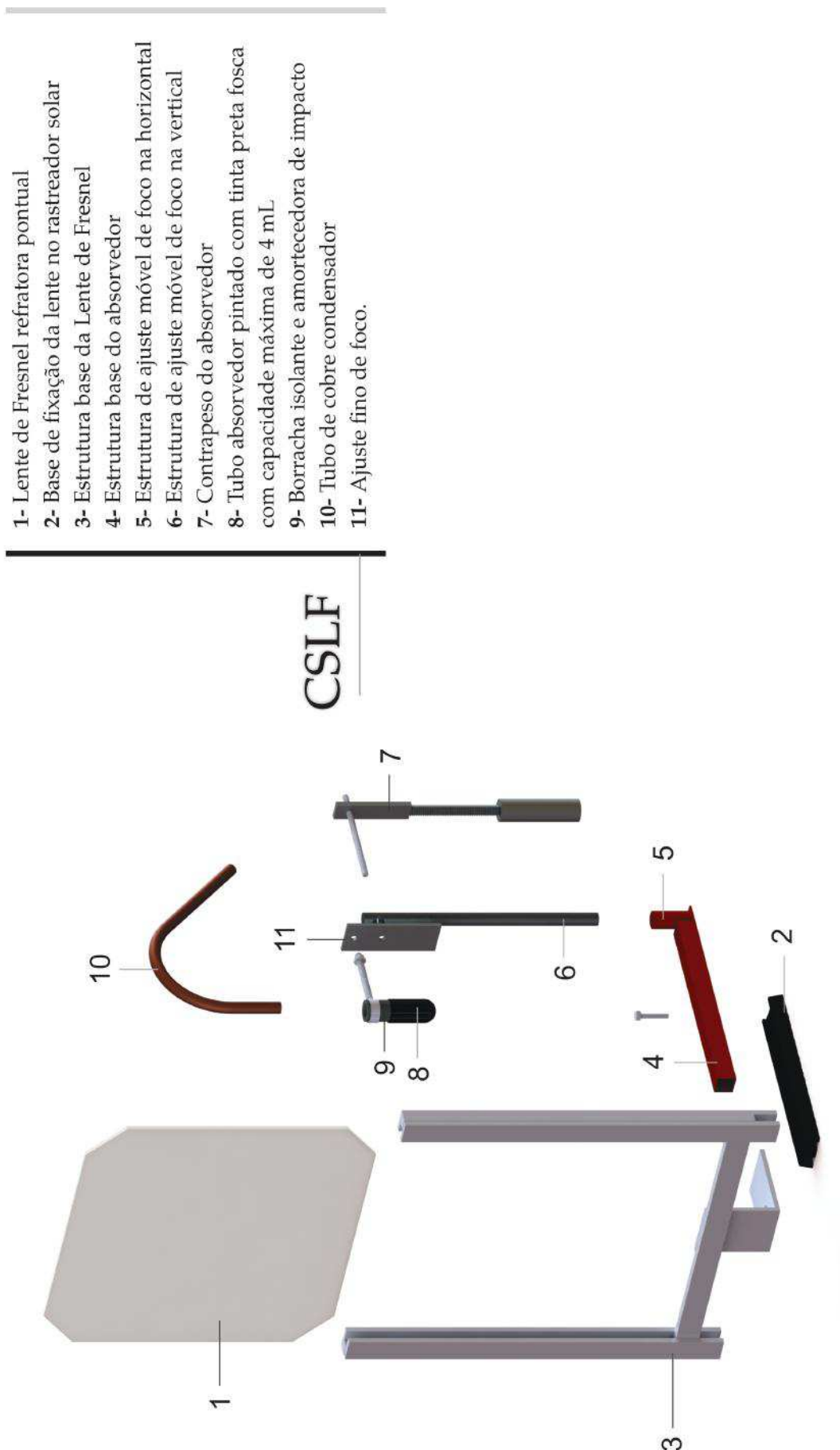


Figura 4.15: Vista explodida do Concentrador Solar de Lente de Fresnel.

A segunda configuração (Figura 4.16-b) era um tubo de ensaio pintado de preto fosco que trincava com facilidade. A terceira configuração (Figura 4.16-c) tinha um bocal mais largo, que possibilitava uma melhor disposição entre a entrada da solução salina, a saída do destilado por vapor bem como a inserção do termopar. Ela era em vidro, pintado de preto fosco e mais resistente. O controle da evaporação foi realizado por esferas de vidro. Também houve necessidade de corrigir o deslocamento do rastreador solar equatorial com um contra-peso que tinha características semelhantes a do concentrador solar de disco. O sistema de condensação era o mesmo tubo de cobre retorcido e a tubulação de silicone.

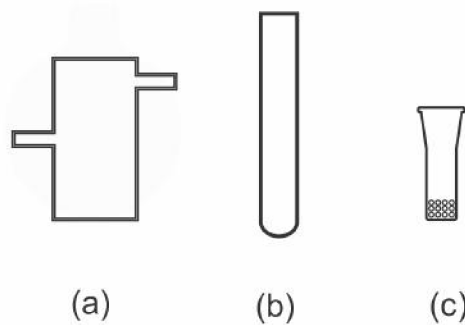


Figura 4.16: Evolução do evaporador, utilizado nos experimentos do CSLF.

4.2 Resultados Experimentais

A implementação do algoritmo de rastreamento solar serviu para o apontamento inicial da unidade. Esse apontamento garantia precisão na orientação do coletor solar durante todo o ensaio, uma vez que a unidade era móvel e precisava ser ajustada a cada experimento. No Apêndice A, foram simulados valores tendo como variáveis de resposta DEC e RA. Esse direcionamento foi realizado tanto para o concentrador solar de disco quanto para concentrador solar de Lente de Fresnel.

4.2.1 Parâmetros do Concentrador Solar de Disco

A seguir são descritos os parâmetros investigados referentes ao concentrador solar de disco (CSD) que foram a curvatura, a distância focal, os ângulos de borda e limite, o fator de interceptação, a eficiências ópticas e dinâmica de aquecimento que possibilitou traçar as temperaturas máximas, a rampa de aquecimento e a eficiência térmica instantânea.

Curvatura

A curvatura da antena parabólica foi determinada por medição resultando em duas parábolas principais, conforme as Equações 4.1 e 4.2 . Essa superfície, teve como características fundamentais: altura de 68,0 cm, largura de 62,0 cm e uma profundidade máxima de 5,2 cm. Através dessas características, foi possível determinar teoricamente a distância focal localizada a 55,57 cm e 49,23 cm do centro da bacia. O foco, mesmo sendo parabólico, foi duplo por se tratar de uma estrutura oval e não circunferencial. O índice de concentração (C) considerando o balão de vidro como absorvedor foi de 106,24 sois o que, conforme a classificação adotada por Leutz e Suzuki (2001), é considerado alto.

$$y_1 = \left(\frac{1}{4}\right) \frac{x^2}{55,57} \quad (4.1)$$

$$y_2 = \left(\frac{1}{4}\right) \frac{x^2}{49,23} \quad (4.2)$$

No entanto, os experimentos indicaram que a melhor captação ocorria a 53,5 cm, em um ponto intermediário aos dois focos, originando uma região focal, essa distância também foi simulada e ilustrada pela Figura 4.17.

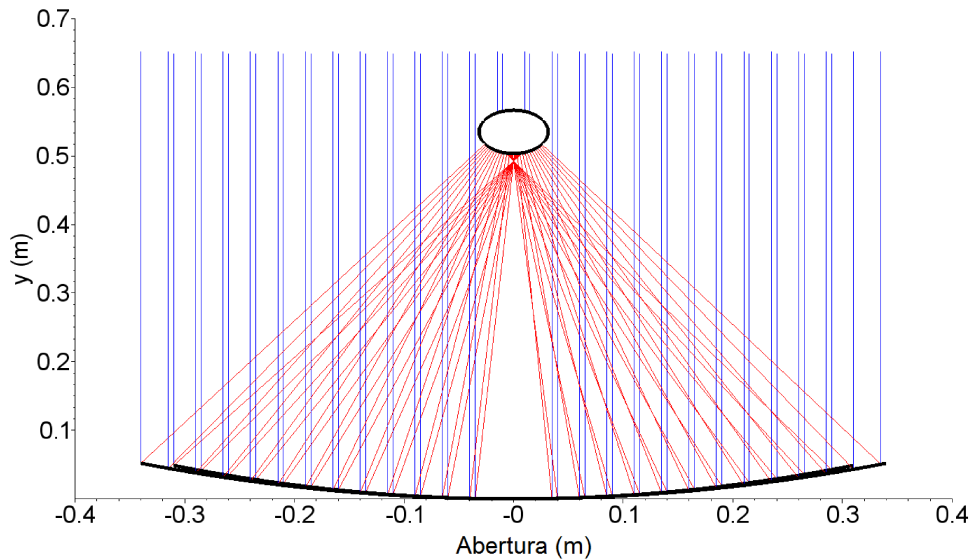


Figura 4.17: Ilustração da incidência dos raios solares considerando as duas curvaturas e uma distância focal de 53,5 cm.

Contudo, nos testes experimentais, os raios apesar de apresentaram uma tendência à convergência as regiões focais era divergentes. No que diz respeito aos ângulos de borda

(θ_r), eles foram calculados através de *software* CAD tanto para parábola de maior abertura quanto para a de menor abertura resultando em $34,26^\circ$ e $31,59^\circ$, respectivamente.

Quanto maior é o ângulo de borda menor é a distância focal. Em contrapartida, maior também é o comprimento do arco da parábola, o que gera maiores custos de material na fabricação da parábola. Valores maiores do que 90° posicionam a borda da curvatura acima do ponto central do absorvedor e valores menores do que 90° posicionam a borda da curvatura abaixo do ponto central do absorvedor. O valor de borda igual a 90° iguala a altura entre a borda da curvatura e o ponto central do absorvedor.

Os ângulos limite (θ_{lim}) foram $4,74^\circ$ e $4,81^\circ$, respectivamente para a maior e menor abertura. Considerando que o Sol se movimenta a uma taxa de $15^\circ.h^{-1}$ esses valores significam que o sistema de rastreamento poderia estar parado durante aproximadamente 19 min e mesmo assim, os raios solares refletidos estariam focados no absorvedor.

Fator de Interceptação (γ_i)

O fator de interceptação foi determinado experimentalmente isolando a parábola refletora com tiras de fita adesiva. Uma escala concêntrica foi estabelecida e simulava um absorvedor de até 11 cm de diâmetro com o objetivo de mensurar a área útil da parábola, conforme o tamanho do absorvedor. O mapeamento foi apresentado na Figura 4.18.

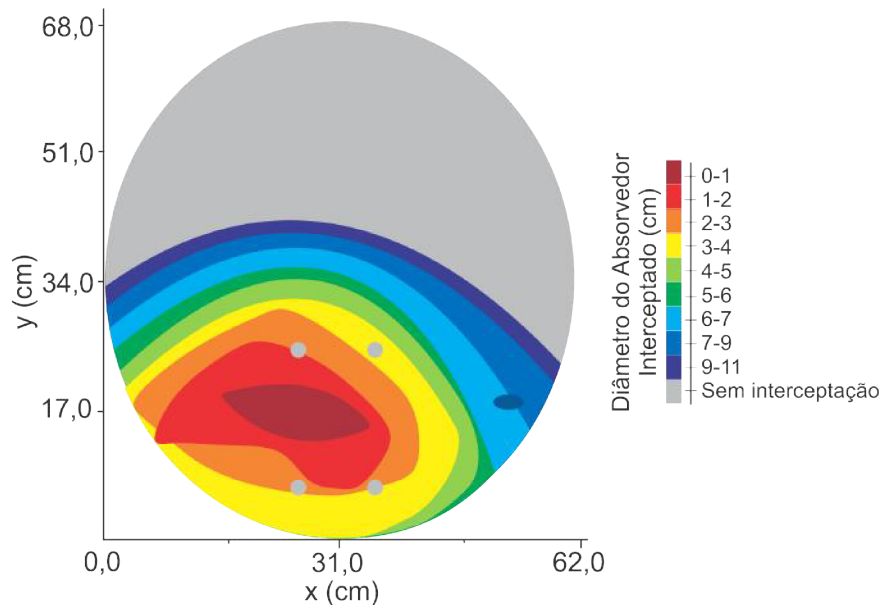


Figura 4.18: Área mapeada do fator de interceptação conforme o tamanho do absorvedor para o CSD.

As áreas correspondentes a escala de cores foram contabilizadas e estão vinculadas ao diâmetro do absorvedor interceptado. Porém, a região em cinza corresponde à região em

que os raios solares não atingiram o absorvedor. As quatro circunferências menores, em cinza, são os orifícios dos parafusos de fixação.

Assim sendo, os experimentos da dinâmica de aquecimento que utilizaram como absorvedor o corpo de prova maior, com 10,11 cm de diâmetro, tiveram como referências de cálculo uma área receptora de 46,92% dos raios solares que atingiram a parábola refletora. Já nos experimentos de dinâmica de aquecimento que utilizaram o corpo de prova menor, com 5,14 cm de diâmetro, a área correspondente foi de 33,45%. Enquanto que para os experimento de dessalinização, utilizando o balão de vidro como absorvedor, a área que efetivamente o atingia era de 35,71%, o que foi ilustrados pela Figura 4.19, que quantifica no eixo das ordenadas intitulada γ_i local, o fator de interceptação de cada faixa de diâmetro do absorvedor e no eixo das ordenadas intitulado γ_i acumulado, os valores de interceptação correspondentes desde o centro do absorvedor.

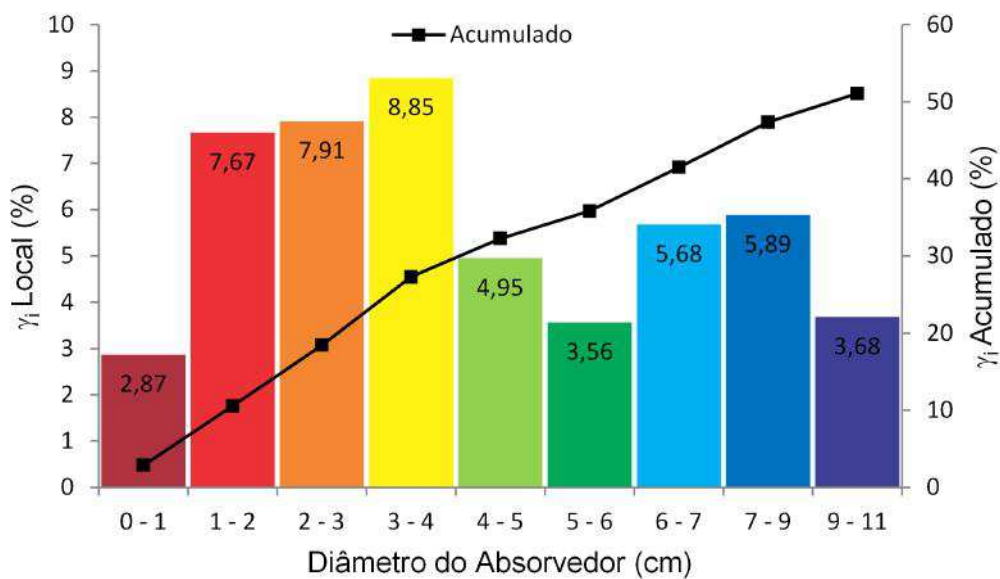


Figura 4.19: Área de concentração atuante na parábola.

Logo, considerando que a área total da parábola refletora possuía 0,3312 m², as áreas úteis aproveitadas pelos absorvedores foram de 0,1554 m², 0,1180 m² e 0,1182 m² para o corpo de prova maior, menor e para o balão de vidro, respectivamente.

Todavia, considerando que a parábola cromada teve o índice de refletividade médio, no comprimento de onda observado, de 0,78 (PALIK, 1997), que não houve cobertura transparente sobre o absorvedor e que a tinta preta fosca teve absortividade de 0,97 (ÇENGEL; GHAJAR, 2011) foi possível calcular a eficiência óptica do sistema (η_o) equivalente a 0,270.

Dinâmica de Aquecimento

A rampa de aquecimento foi determinada experimentalmente utilizando dois corpos de provas (CP) de alumínio, pintados de preto fosco, com os mesmos tamanhos da dinâmica de aquecimento simulada anteriormente. A Figura 4.20 ilustra a dinâmica de aquecimento utilizando o CP maior. Neste ensaio, com duração de 3600 s, iniciando com uma temperatura ambiente de 32°C, característica do dia que foi realizado o experimento, foi possível atingir uma temperatura de equilíbrio de 200°C aos 2040 s. A irradiação média durante os testes foi de 890 W.m⁻², a mesma utilizada para a simulação numérica.

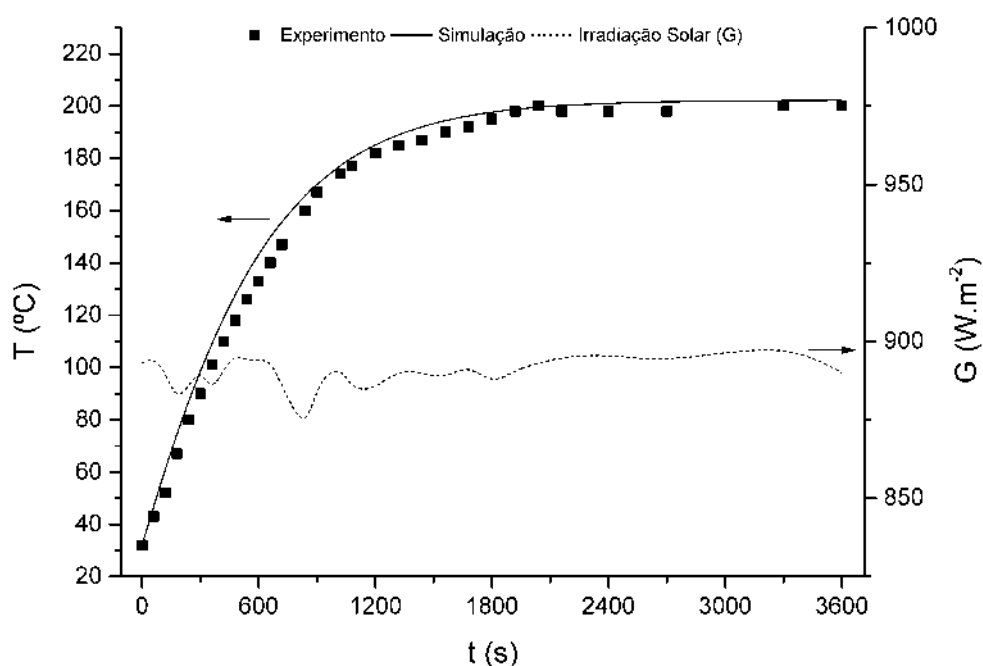


Figura 4.20: Dinâmica de aquecimento utilizando um CP com diâmetro maior.

A dinâmica de aquecimento do CP menor é apresentada na Figura 4.21. Neste experimento, que durou 1800 s, partindo da temperatura ambiente de 32°C, foi possível atingir uma temperatura de equilíbrio de 319°C aos 840 s. Até o fim do teste, ela alcançou 323°C, considerando também um ligeiro aumento da irradiação solar que teve média total de 879 W.m⁻².

Os valores da simulação numérica foram considerados representativos dos experimentos para a rampa de aquecimento e para a temperatura de equilíbrio. O erro médio entre os dois foi de aproximadamente 4,5% de tal forma que o simulado superestima o experimental. Isso pode ser devido tanto a falta de um modelo empírico que considere a movimentação do rastreamento solar quanto pela variação da velocidade do vento ao longo dos experimentos.

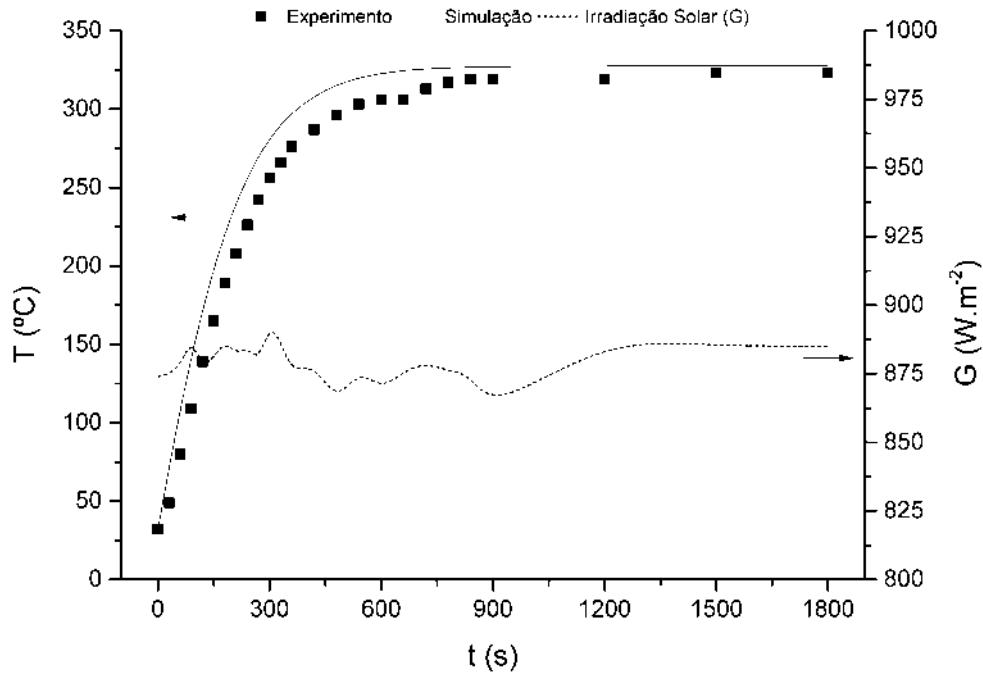


Figura 4.21: Dinâmica de aquecimento utilizando um CP com diâmetro menor.

Os experimentos foram realizados em dia de céu aberto, portanto sem interferência de nebulosidade ou de sombras. A contabilização da irradiação foi realizada de forma instantânea, de segundo a segundo, através do armazenamento de dados em um cartão de memória. Logo, a variação apresentada nos gráficos se deve a fatores como a sensibilidade do equipamento e a variação da irradiação ao longo do dia. Essa variabilidade, não perturbou o sistema pois, em grande parte, ela não se manteve por tempo suficiente para que isso ocorresse.

Logo, as rampas de aquecimento foram determinadas conforme a Tabela 4.2. Os números entre parênteses fazem referência ao tempo necessário para atingir a temperatura mencionada (s). Enquanto que os números fora dos parênteses mencionam à taxa de aquecimento ($^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$). Todos esses resultados foram experimentais.

No que diz respeito à simulação, a temperatura de equilíbrio do CP maior foi de $202,24^{\circ}\text{C}$, em contraste com 200°C experimental, por isso, os valores maiores do que 200°C não foram contabilizado na tabela, para o CP maior (****). Já para o CP menor, a temperatura de equilíbrio foi de $327,47^{\circ}\text{C}$ e a experimental foi igual a 319°C .

A eficiência térmica instantânea (η) foi calculada ao longo do experimento resultando na Figura 4.22 que tratou dos corpos de prova maior e menor. No tempo de 0 s a diferença entre eles foi em consequência da diferença entre o Fator de Intercepção (γ_i) do CP maior e menor, o que gerou diferentes Eficiências Ópticas (η_o). Essa última variável

foi fundamental para o cálculo da Eficiência Térmica (Equação (2.17)).

Tabela 4.2: Rampa de aquecimento experimental para o CSD.

Temperaturas	CP Maior ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	CP Menor ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
Até 100°C	11,33 (360)	75,56 (54)
Até 150°C	9,47 (748)	53,23 (133)
Até 175°C	8,40 (1020)	52,64 (163)
Até 200°C	4,94 (2040)	50,40 (200)
Até 300°C	****	31,10 (517)
Até 319°C	****	20,50 (840)

Entretanto, a diferença entre essas duas dinâmicas aumentou no tempo aproximado de 600 s, devido a maior velocidade do CP menor em atingir a Temperatura de Equilíbrio. A partir desse instante, as curvas se aproximaram novamente. Caso a dinâmica do CP menor continuasse, as curvas se igualariam no tempo de 2040 s, momento em que o CP maior alcançou a temperatura de equilíbrio. Portanto, quanto mais próximo a dinâmica de aquecimento está da temperatura de equilíbrio menor é a eficiência térmica instantânea.

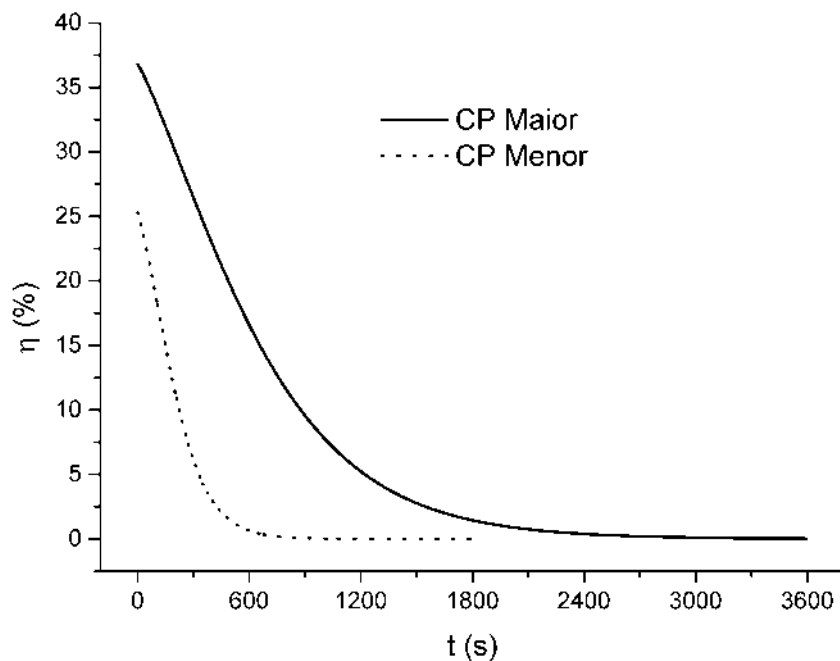


Figura 4.22: Eficiência térmica instantânea (η) ao longo do experimento no CSD.

4.2.2 Parâmetros do Concentrador Solar Lente de Fresnel

Da mesma maneira que o CSD, a seguir, serão descritos os parâmetros referentes ao Concentrador Solar de Lente de Fresnel (CSLF).

Superfície

A face da Lente de Fresnel era plana, de acrílico e chanfrada nos quatros lados. Como características fundamentais teve-se: 31 cm de altura, 31 cm de largura e 4 cm de chanfro. As ranhuras de concentração da lente foram contabilizadas como área de abertura o que correspondeu a $0,0889 \text{ m}^2$, aproximadamente um terço do CSD. O índice de concentração (C) ideal calculado para o sistema foi de 220,60 sois, classificado como alto. A distância focal foi de 15,3 cm o que possibilitou uma construção simplificada do sistema. O ângulo limite foi de $2,5^\circ$, o que possibilita ao sistema funcionar por 10 min sem que haja necessidade do rastreador solar.

Fator de Interceptação (γ_i)

O fator de interceptação foi determinado da mesma forma que no CSD, resultando no mapeamento da Lente de Fresnel (Figura 4.23).

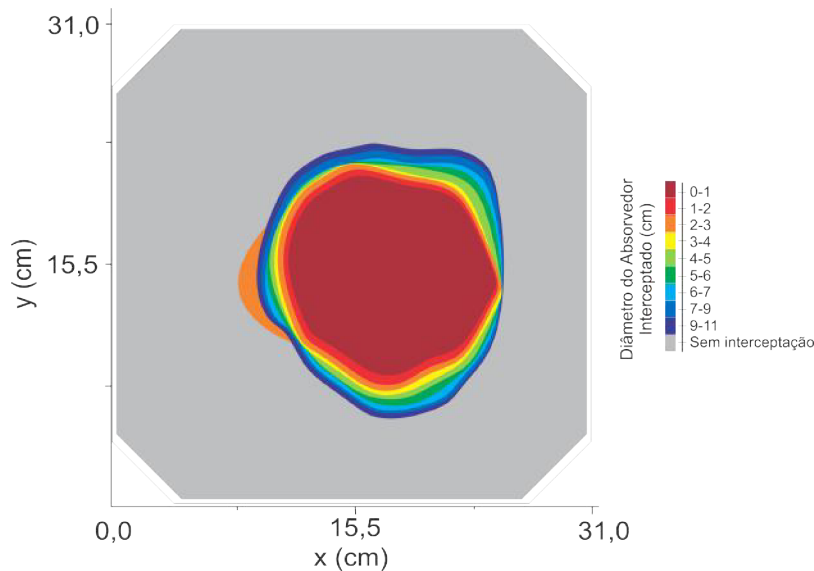


Figura 4.23: Área mapeada do fator de interceptação conforme o tamanho do absorvedor no CSLF.

Os eixos x e y dimensionaram a vista frontal da Lente de Fresnel. Já a escala colorida indicou a região do absorvedor que os raios solares refratados foram interceptados, considerando o centro do absorvedor como a origem. A área em cinza correspondeu à

fração que não atingia o corpo de prova especificado ou que não formava imagem, o que correspondeu a 73,90%. Esta escala foi utilizada para mensurar a área útil, conforme o tamanho do absorvedor. No entanto, a Figura 4.24 detalha o fator de interceptação considerando o diâmetro do absorvedor.

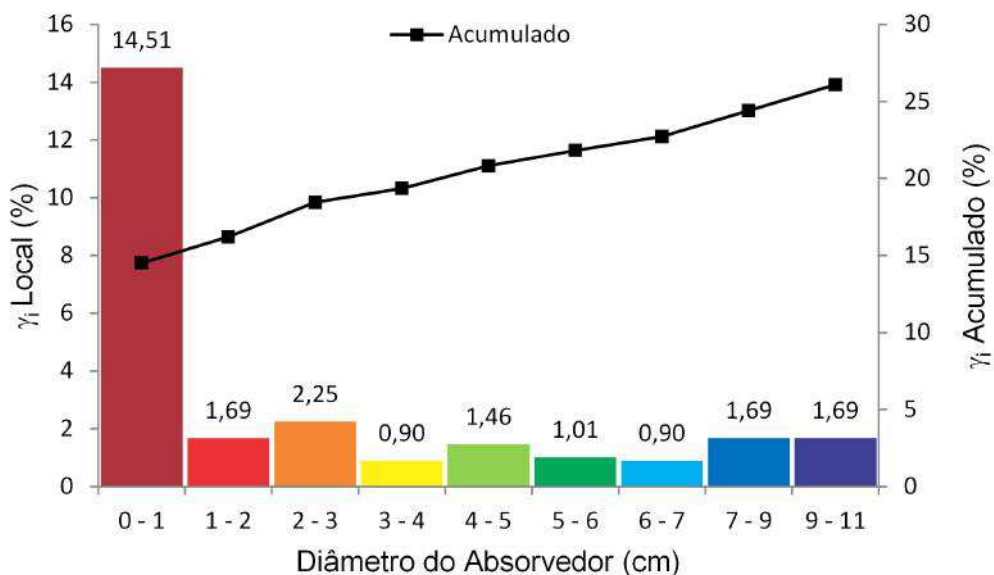


Figura 4.24: Área de concentração atuante na Lente de Fresnel.

Logo, os experimentos da dinâmica de aquecimento que utilizaram como absorvedor o CP maior, tiveram como referências de cálculo um fator de interceptação de 26,10%. Enquanto que os experimentos que utilizaram o CP menor, o fator de interceptação foi de 20,81%. E os experimentos de dessalinização, utilizando o vidro temperado como absorvedor, teve um fator foi de 16,20%.

Assim sendo, considerando que a área total da Lente de Fresnel possuía 0,0889 m² as áreas úteis aproveitadas pelos absorvedores foram de 0,0185 m², 0,0232 m² e 0,0144 m² para os CP maior, menor e para o tubo de vidro, respectivamente.

Contudo, considerando que a Lente de Fresnel teve um índice de transmissividade médio, segundo o fabricante, de 0,92 no comprimento de onda observado, que não havia cobertura transparente sobre o absorvedor e que a tinta preta fosca tinha absorvidade de 0,97 (ÇENGEL; GHAJAR, 2011) foi possível calcular a eficiência óptica do sistema (η_o) equivalente a 0,144.

Dinâmica de Aquecimento

Os absorvedores utilizados para a dinâmica de aquecimento do concentrador solar de Lente de Fresnel foram os mesmos corpos de prova anteriores. A Figura 4.25 ilustra a dinâmica de aquecimento do CP maior. Neste experimento, que teve duração de 5400 s, a temperatura ambiente foi de 30°C, cuja temperatura máxima foi de 72°C. A irradiação média durante o ensaio foi de 890,25 W.m⁻².

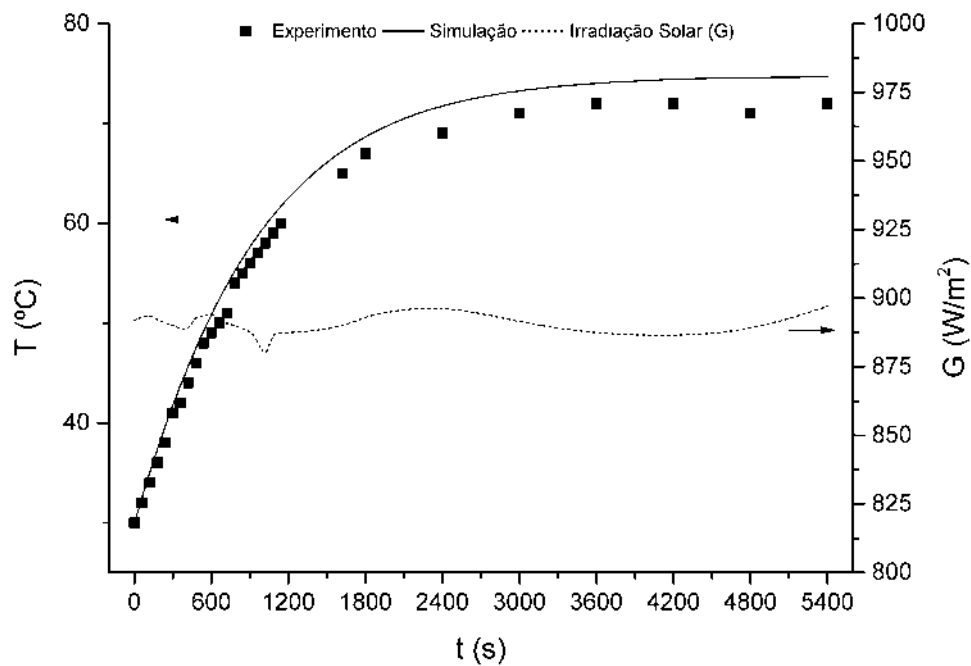


Figura 4.25: Dinâmica de aquecimento utilizando um CP maior para o CSLF.

Já a dinâmica de aquecimento do CP menor, pode ser visualizado na Figura 4.26. A duração desse experimento foi de 1800 s, a partir de uma temperatura ambiente de 27°C, cuja temperatura de equilíbrio foi de 134°C e a irradiação média durante o ensaio foi de 984,45 W.m⁻², irradiação essa utilizada para a simulação.

Assim, as rampas de aquecimento foram determinadas experimentalmente e são apresentadas na Tabela 4.3. Da mesma forma com que foi mencionado para a Tabela 4.2, os números entre parênteses fazem referência ao tempo necessário para atingir a temperatura descrita (s), enquanto que os números fora dos parênteses dizem respeito à taxa de aquecimento (°C.min⁻¹). Portanto, na parte da simulação numérica, a temperatura de equilíbrio do CP maior foi de 74,67 °C em contraste com o experimental que foi de 72,0°C, por isso, os valores maiores do que esse não foram contabilizado na tabela, para o CP maior (****). Já para o CP menor, a temperatura de equilíbrio foi de 134,21°C e o experimental foi igual a 134,0°C.

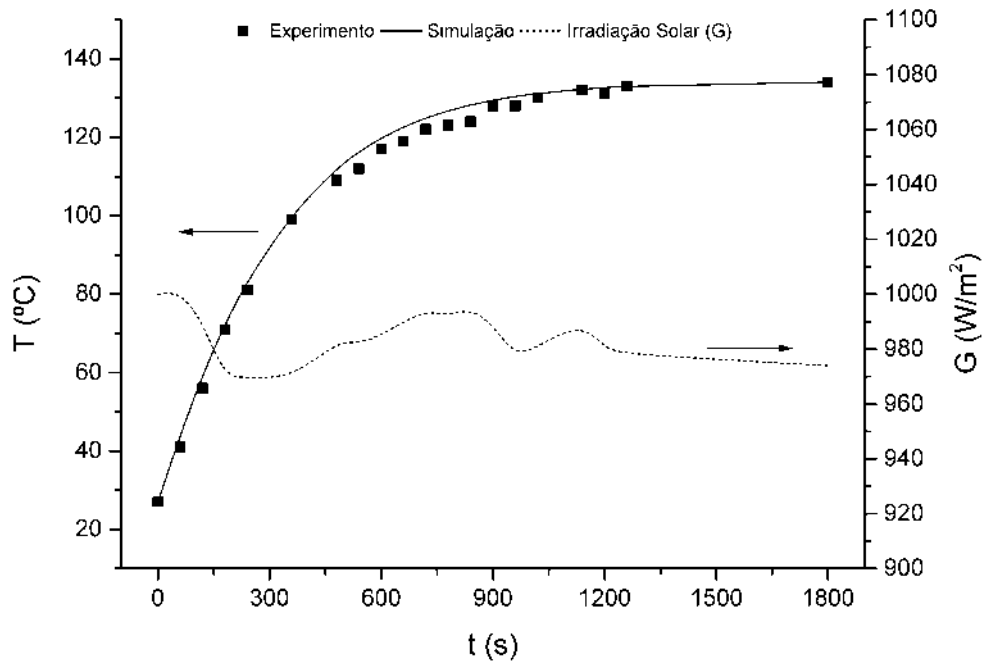


Figura 4.26: Dinâmica de aquecimento utilizando um CP menor para o CSLF.

Tabela 4.3: Rampa de aquecimento experimental no CSLF.

Temperaturas	CP Maior ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	CP Menor ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)
Até 50°C	1,82 (660)	19,16 (72)
Até 72°C	0,70 (3600)	14,52 (186)
Até 75°C	****	14,12 (204)
Até 100°C	****	11,90 (368)
Até 125°C	****	6,93 (848)
Até 134°C	****	3,57 (1800)

A Eficiência Térmica Instantânea (η) foi calculada ao longo do experimento resultando na Figura 4.27 que trata dos corpos de prova maior e menor. Nota-se que por se tratar de uma eficiência correlacionada à temperatura do instante anterior e devido à diminuição do ganho térmico quando mais próximo à temperatura do equilíbrio, a tendência dessa eficiência é decrescente até que se igual a 0 no instante do equilíbrio.

Assim, da mesma forma com que ocorreu nos experimentos utilizando o CSD, no tempo de 0 s, a diferença entre os resultados foi consequência da diferença entre o Fator de Intercepção (γ_i) entre o CP maior e menor, o que gerou diferentes Eficiências Ópticas (η_o). Essa última variável foi a base para o cálculo da Eficiência Térmica (Equação (2.17)).

Conquanto, a diferença entre essas duas dinâmicas aumenta no tempo aproximado de

800 s, devido a uma maior velocidade do CP menor em atingir a temperatura de equilíbrio. E a partir desse instante, eles se aproximaram novamente. Caso a dinâmica do CP menor continuasse, eles se igualariam no momento em que o CP maior alcançou a temperatura de equilíbrio.

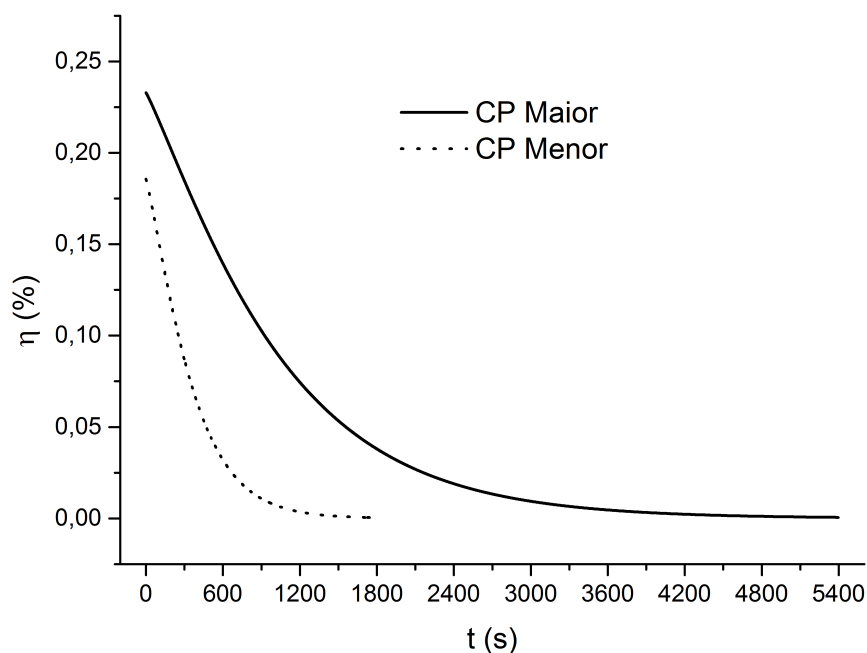


Figura 4.27: Eficiência térmica instantânea (η) ao longo do experimento para o CSLF.

4.2.3 Dessalinização

Os experimentos envolvendo a dessalinização tinham como objetivo a análise do desempenho dos sistemas de concentração solar de disco e da Lente de Fresnel. Foram testadas amostras salinas com concentrações comuns em águas subterrâneas e oceânicas. Para isso, foram preparadas soluções de mesma massa, nas concentrações de 0%, 1%, 2%, 3% e 4% de sal marinho, submetidas a testes em dias distintos. Os resultados são apresentados a seguir.

Concentrador Solar de Disco (CSD)

Na Figura 4.28 é ilustrada a produção de água destilada (P) em contraste com a variação da concentração de sal marinho (Θ). Os experimentos foram realizados, entre 09:00h e 16:00h dos dias 04/09/2014, 05/09/2014, 07/09/2014, 08/09/2014 e 09/09/2014.

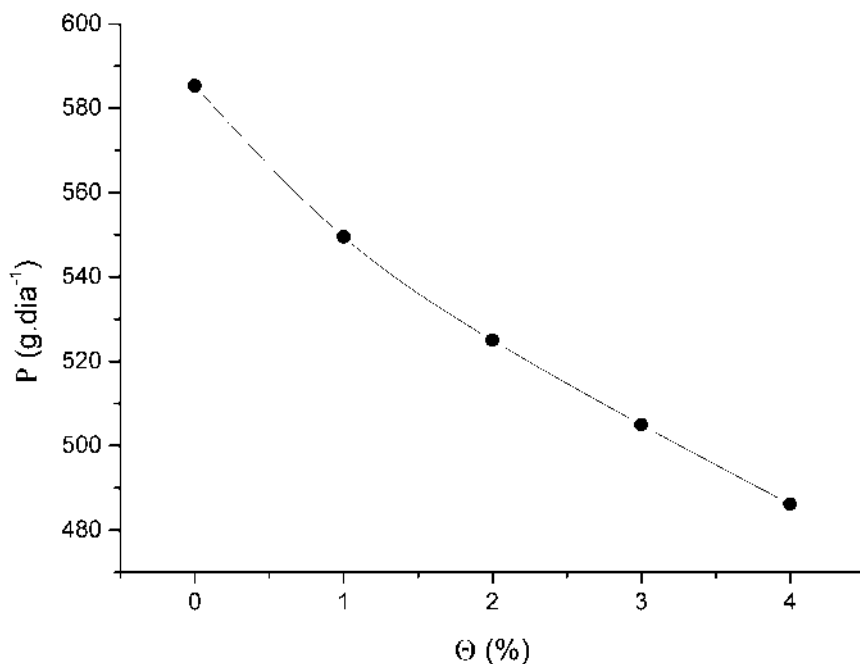


Figura 4.28: Produção de água destilada para diferentes concentrações de sal marinho no CSD.

Assim, a irradiação solar média dos ensaios foi de $791 \pm 11 \text{ W.m}^{-2}$. A maior produção foi a da amostra sem adição de sal marinho, que obteve 585,3 g de água destilada. A produção foi decrescente, com coeficiente de correlação linear (r) igual a -0,99, conforme a concentração da solução aumentava. Tal fato já era esperado em face do efeito coligativo que diminui a pressão de vapor da solução à medida que a concentração de sais é aumentada (tonoscopia). Assim, a produção mínima investigada foi de 486,1 g de água destilada para uma concentração de 4% de sal marinho.

Em contrapartida, a Figura 4.29 apresenta as temperaturas de ebulição, que nos casos sugeridos foram equivalentes as temperaturas de equilíbrio, para as diferentes concentrações de sal marinho. Ilustra também, a produção de água destilada considerando a área de reflexão do CSD que efetivamente refletia a luz solar para o absorvedor que atingiu uma produtividade acima de $5 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$.

Portanto, os pontos de ebulição aumentaram à medida que a quantidade de soluto na solução também foi acrescido, o que foi previsto na Seção 2.5.5, esse efeito é conhecido como ebulioscopia. A temperatura média aumentou de $98,10^\circ\text{C}$ (0%) para $99,66^\circ\text{C}$ (4%). Todavia, esses valores são menores do que 100°C porque essa referência é baseada em experimentos no mesmo nível do mar, ou seja, com uma altitude de 0 m. Neste caso, os experimentos foram realizados com uma altitude de 938 m, ou seja, com uma menor pressão atmosférica.

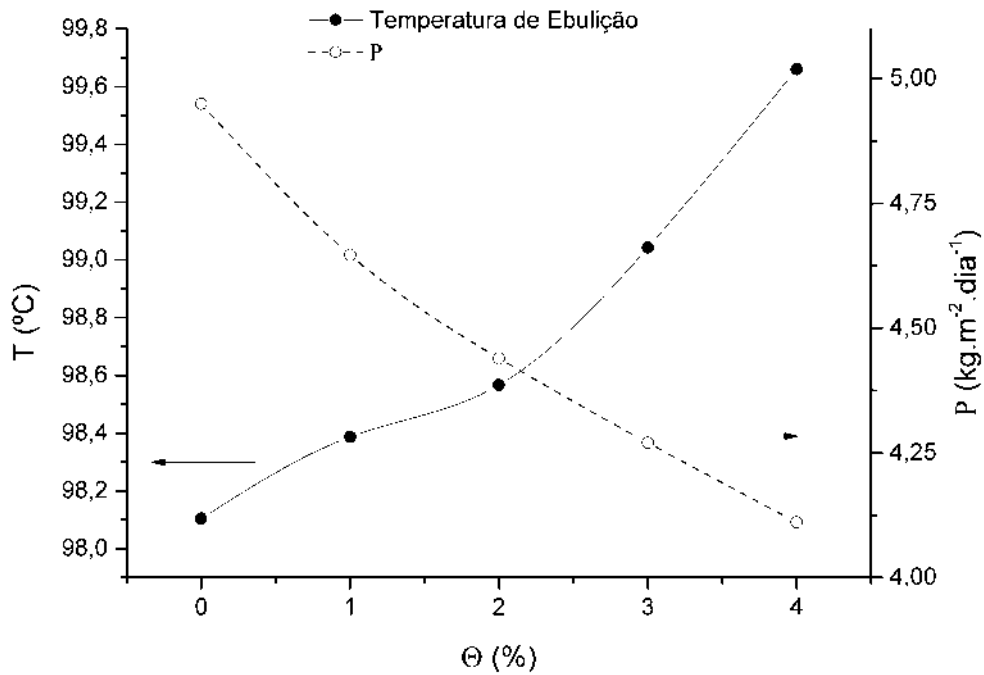


Figura 4.29: Temperatura de ebulição e produção de água destilada considerando a área atuante do CSD.

A ebulição mantida por aproximadamente 1 min, aparentemente independente da altitude, já torna a água desinfetada (SOUTH-PAUL *et al.*, 2014). Sem embargo, uma outra contribuição para essa desinfecção é a utilização da faixa de ondas Ultravioleta provinda da irradiação solar que já eliminaria bactérias, vírus, protozoários, fungos e helmintos das mais variadas espécies dentre elas *Campylobacter jejuni*, *Enterococcus sp.*, *Streptococcus faecalis*, *Salmonella typhi*, *Shigella dysenteriae Type I*, *Staphylococcus epidermidis*, *Encephalomyocarditis virus*, *Polio virus*, *Rotavirus*, *Norovirus*, *Entamoeba sp. (cysts)*, *Giardia sp (cysts)*, *Fusarium sp.* e *Ascaris sp (ova)* (MCGUIGAN *et al.*, 2012). A respeito da produção de água destilada no dia, considerando a área útil do disco, a máxima registrada foi de 4,95 kg.m⁻².dia⁻¹.

A eficiência do condensador (η_r) ao resfriar água destilada é apresentado pela Figura 4.30. A legenda de título *Cobre* faz referência a eficiência do condensador retorcido de cobre, ou seja, considerando a temperatura do evaporador como T_o e a temperatura de saída do tubo de cobre como T_f , conforme a Equação (3.41). A legenda *Silicone* faz referência à eficiência de resfriamento da tubulação de silicone, sendo que a temperatura de saída do tubo de cobre foi T_o e a temperatura da saída da tubulação de silicone foi T_f . Finalmente, a legenda *Total* considera todo o sistema de condensação, sendo a temperatura do evaporador T_o e a temperatura da saída da tubulação de silicone T_f .

A média de resfriamento do condensador completo (*Total*) foi de 62,28% com desvio

padrão de 1,02%, o que correspondeu a uma redução média de temperatura de 60,51°C. Desse percentual, a curvatura de cobre foi responsável por 13,00% do resfriamento, enquanto que o tubo de silicone por aproximadamente 55,35%. Por conseguinte, nessas condições, o equipamento foi capaz de resfriar o líquido até chegar a 38,23°C, em média. O que é razoável pois a temperatura ambiente estava em média 32°C.

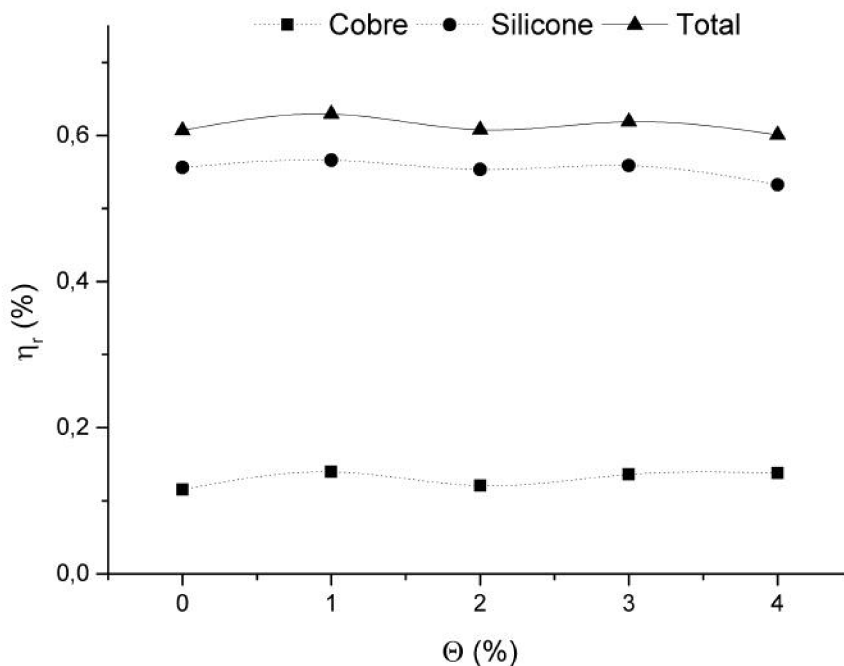


Figura 4.30: Eficiência de resfriamento do condensador para o CSD.

Pela Figura 4.31, pode-se acompanhar a produção de água destilada ao longo do dia, na faixa horária estudada. Constatou-se que nos horários de maior incidência de irradiação solar, entre 12:00 e 13:00 h, houve uma aproximação da produção de água destilada para todas as concentrações o que indica que o efeito das propriedades coligativas é minimizado com o acréscimo da fonte de calor.

Outro comportamento constatado foi o de que todas as faixas seguem uma tendência da irradiação solar ao longo do dia (Figura 4.32). O que justifica a flutuação da produção entre as concentrações quando vista de hora a hora (Figura 4.31).

Não obstante, essa variação é suavizada analisando a produção acumulada ao longo do dia (Figura 4.33). Um aumento na nebulosidade, que seja por instantes, pode causar uma redução produtiva como ocorreu para a concentração de 0%, no horário local das 16:00h já que um simples traço de névem pode reduzir em 90% a irradiação solar.

Entre as 09:00h e as 14:00h os efeitos da tonoscopia, para a concentração de 4%, foi compensado por uma irradiação solar superior à dos ensaios experimentais da concentração de 3%, o que resultou em uma produtividade maior nessa faixa horária. Porém, após

as 14:00h, com a redução da intensidade da irradiação solar do experimento (4%), essa situação se inverteu.

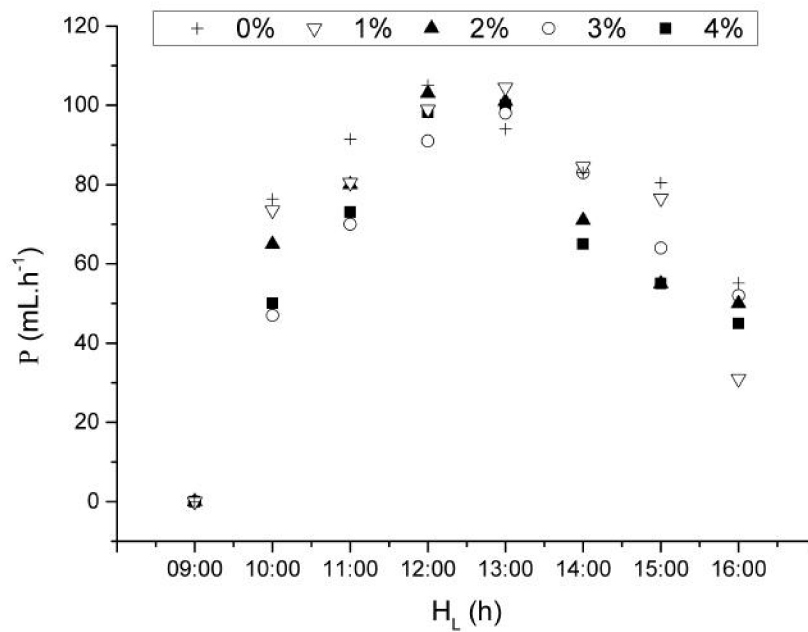


Figura 4.31: Produção de água destilada ao longo do dia para o CSD.

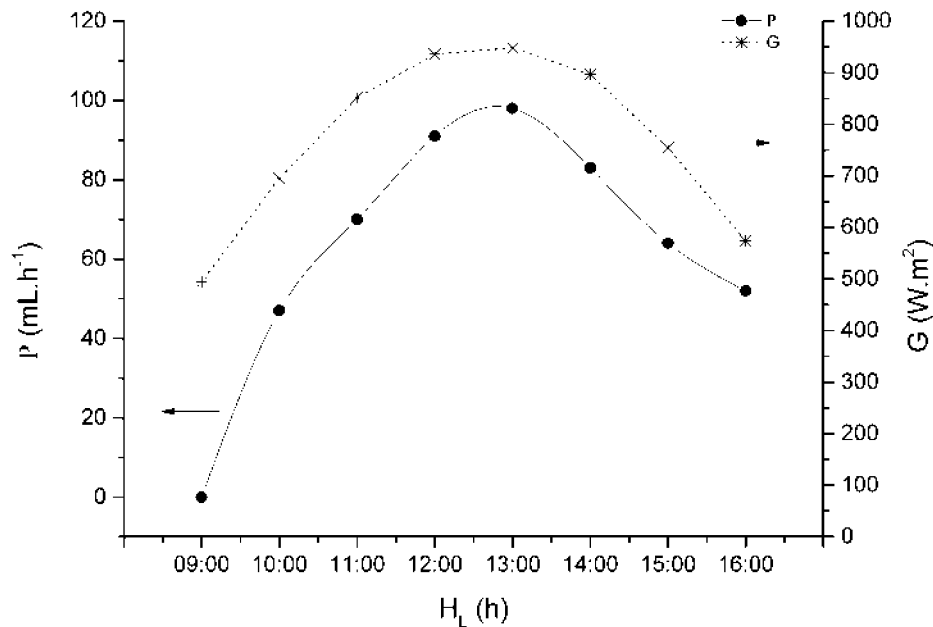


Figura 4.32: Produção de água destilada e irradiação solar ao longo do dia no CSD.

Matematicamente, as curvas apresentaram uma tendência polinomial de terceira ordem com coeficientes de determinação (r^2) superiores a 99,85%, o que indica uma alta representatividade equacional do comportamento. Os ensaios considerando a produção

do dia foram replicados considerando uma margem de erro médio de 1,42%. As condições meteorologias desse ensaios foram semelhantes, com irradiação solar de $798 \pm 13 \text{ W.m}^{-2}$.

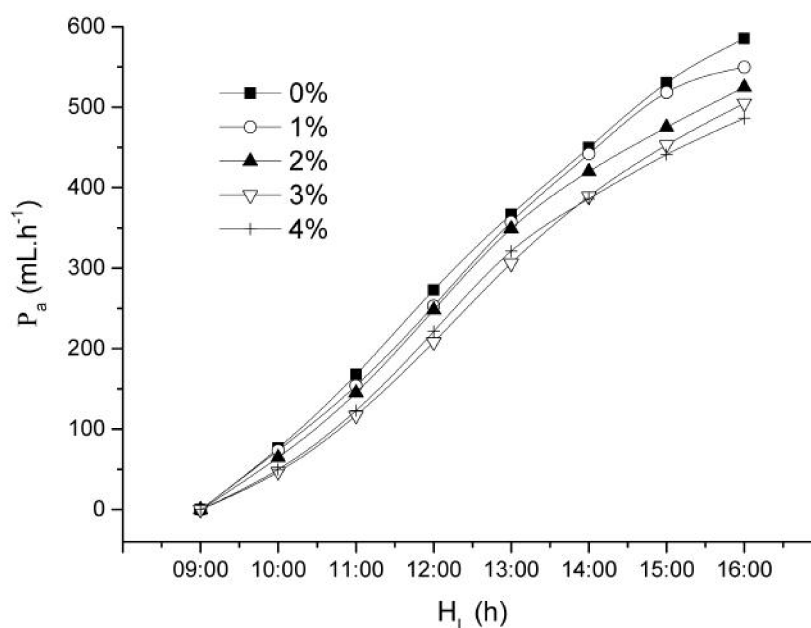


Figura 4.33: Produção de água destilada acumulada ao longo do dia no CSD.

Concentrador Solar de Lente de Fresnel - CSLF

A Figura 4.34, ilustra a produção de água destilada em contraste com a variação da concentração de sal marinho. Os experimentos foram realizados entre 09:00h e 16:00h dos dias 07/01/2015, 08/01/2015, 15/01/2015, 20/01/2015 e 23/02/2015.

A irradiação solar média dos ensaios foi de $848 \pm 11 \text{ W.m}^{-2}$, o que corresponde a um desvio padrão de 1,35%. A maior produção foi a da amostra sem adição de sal marinho, produzindo 80,8 g de água destilada cerca de . A tendência produtiva foi linearmente decrescente, com coeficiente de correlação linear (r) igual a -0,99, à taxa de -1,23% a cada acréscimo 1% de concentração de sal marinho. Logo, a produção mínima relatada foi de 75,8 g de água destilada para uma concentração de 4% de sal marinho. Essa diminuição da produção é consequência da redução da pressão de vapor com o aumento do soluto na solução.

Todavia, a Figura 4.35 apresenta as temperaturas de ebulição e a produção de água destilada considerando a área útil do CSLF. Mais uma vez, registrou-se o efeito de ebulioscopia sendo que a temperatura média aumentou de $98,11^\circ\text{C}$ (0%) para $99,69^\circ\text{C}$ (4%). Da mesma forma mencionada anteriormente, por manter a temperatura de ebulição por mais de 1 min e exposta ondas Ultravioleta, deduz que essa água foi desinfetada.

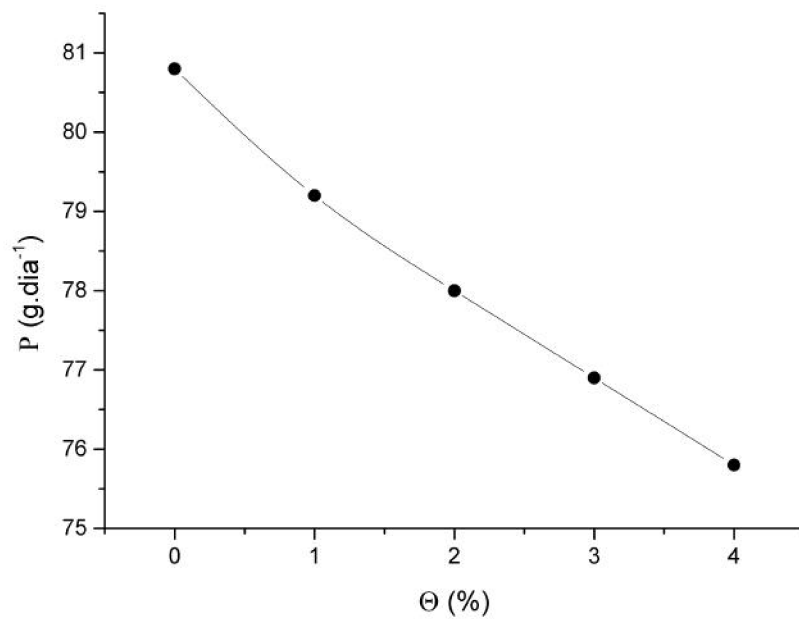


Figura 4.34: Produção de água destilada para diferentes concentrações de sal marinho no CSLF.

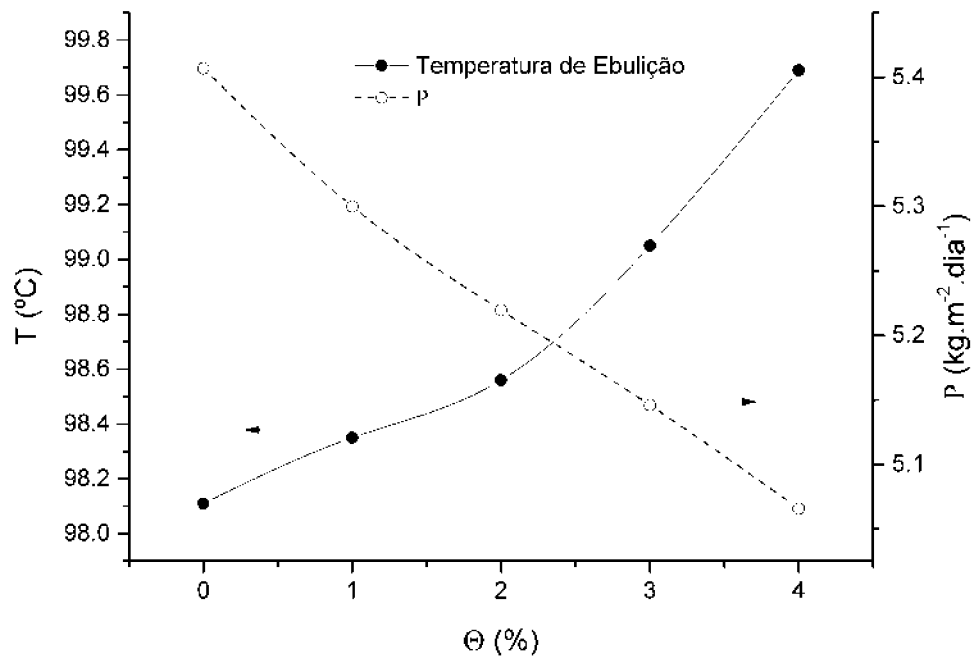


Figura 4.35: Temperatura de ebulição e produção de água destilada considerando a área atuante do CSLF.

Quanto aos valores de produção, eles tornam-se mais significativos do que o Concentrador Solar de Disco considerando a área de interceptação da Lente de Fresnel. Desta forma, a máxima registrada foi de 5,40 kg.m⁻².dia⁻¹ e a mínima 5,06 kg.m⁻².dia⁻¹.

O rendimento do condensador ao resfriar água destilada é apresentado pela Figura 4.36. A legenda intitulada *Cobre*, diz respeito ao rendimento do condensador de cobre, enquanto que *Silicone* faz referência ao rendimento da tubulação de silicone. E por fim, a legenda de título *Total* que considera todo o sistema de condensação.

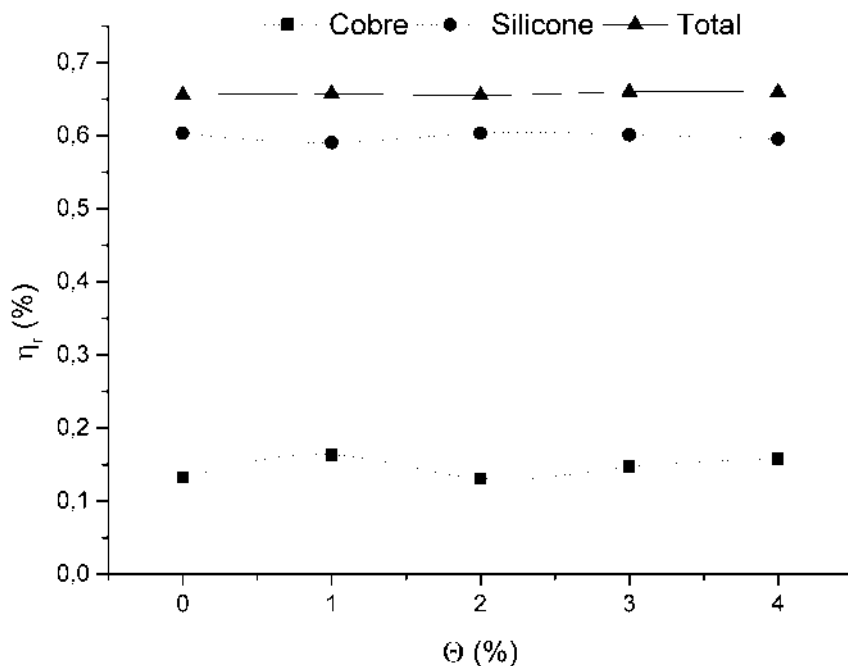


Figura 4.36: Eficiência de Resfriamento do condensador no CSLF.

A média de resfriamento do condensador completo (*Total*) foi de 65,73% com desvio padrão de 0,19%, o que correspondeu a uma redução média de temperatura de 64,91°C. Desse percentual, a curvatura de cobre foi responsável por 14,61% do resfriamento, enquanto que o tubo de silicone por aproximadamente 59,86%. Logo, nessas condições, o equipamento foi capaz de resfriar o líquido até chegar a 33,84°C, em média. A quantidade de fluxo de evaporação menor do que os registrados para o CSD contribui para que a eficiência do sistema de resfriamento fosse superior.

Pela Figura 4.37, pode-se acompanhar a produção de água destilada ao longo do dia, com base nos horários dos experimentos. Notou-se que a produção foi oscilante ao longo dos experimentos, sem que um padrão entre as diferentes concentrações fosse estabelecido, tal qual ocorreu em grande parte com CSD. Isso se deve ao fato de que o sistema teve uma energia útil menor, ficando mais vulnerável às intempéries, o que gerava uma necessidade de recomeço da rampa de aquecimento. Outro fator evidenciado, foi que o fluxo de vapor foi menor do que o sistema anterior, o que, por momentos, gerava acúmulo de destilado na mangueira de silicone. Esse acúmulo, era expurgado em instantes seguintes, mas gerava oscilação na contabilização do destilado.

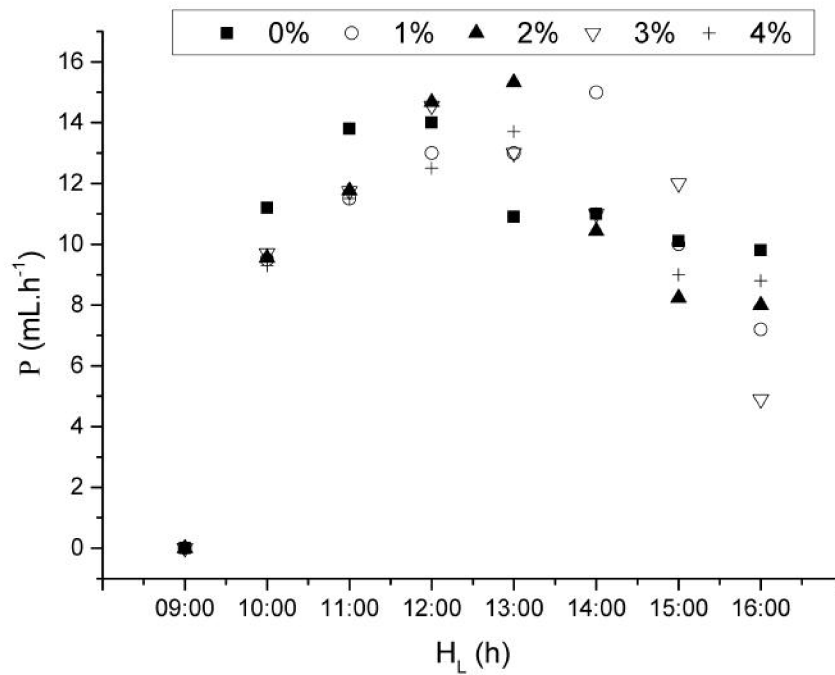


Figura 4.37: Produção de água destilada ao longo do dia no CSLF.

Contudo, a Figura 4.38 faz referência a produção de água destilada acumulada ao longo do dia e suaviza essas flutuações. Exceto pela solução isenta de sal marinho, as produtividades foram semelhantes até as 11:00 e, a partir daí, elas se distanciaram com o aumento da energia fornecida pelo Sol, fator esse inverso ao apresentado pelo CSD. Matematicamente, as curvas apresentaram uma tendência polinomial de terceira ordem com coeficientes de determinação (r^2) superiores a 99,88%.

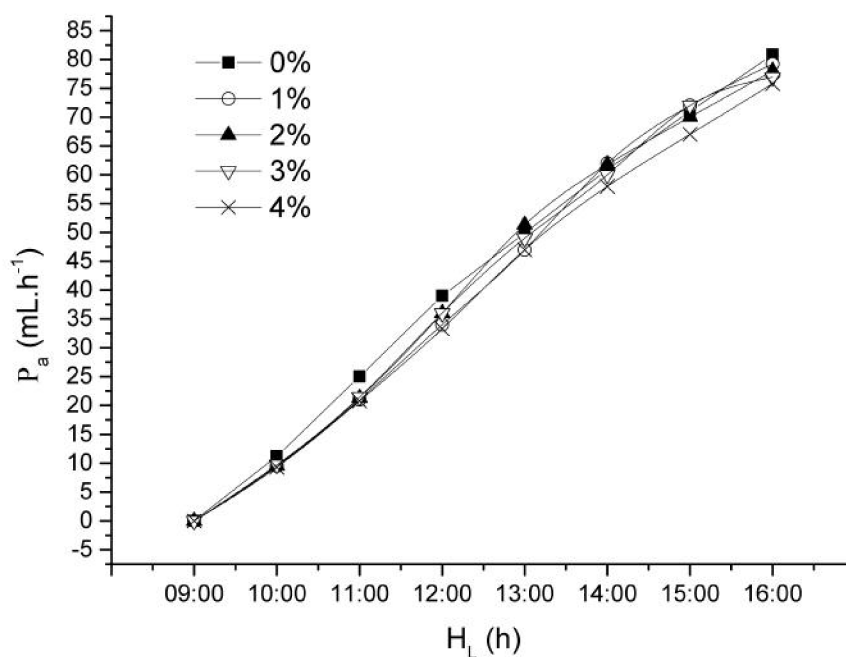


Figura 4.38: Produção de água destilada acumulada ao longo do dia no CSLF.

Portanto, conforme os experimentos realizados, foi possível notar um declínio na produtividade final com um aumento da concentração de sal marinho tanto para o CSD quanto para o CSLF. Sendo que, nesse último, a queda foi menos acentuada. Em contrapartida, o aumento de soluto influenciou no aumento das temperaturas de ebulição, propriedade essa conhecida como ebulioscopia.

Ao longo do dia, o CSD apresentava tendência produtiva semelhante à irradiação solar. A mesma observação também se aplica para o CSLF que se demonstrou mais sensível às variações externas e necessitava de um tempo maior na recuperação do aquecimento da solução. As variações da eficiência de resfriamento não foram consideradas relevantes no que tange às diferentes concentrações.

4.2.4 Planejamento Fatorial

Os testes seguintes investigaram os efeitos das variações da concentração de sal marinho e da massa da solução (carga) das amostras ao longo do dia. Para isso, foram preparados nove ensaios (3^2). A menor carga foi estabelecida pela altura do basalto no balão o que resultou em 20 g de solução. A maior carga foi mensurada com base em testes de arraste de sal marinho do evaporador de 100 mL para o destilado, através de medições de condutividade elétrica.

Assegurou-se que, com 80 g, o destilado não continha traços de sal marinho. A média entre o maior e a menor carga, ou seja 50 g, foi estabelecida como ponto central (carga média). As concentrações também foram divididas em três, igualmente espaçadas, sendo elas de 0%, ou seja, isenta de sal marinho, 2% e 4%. Essas concentrações são comuns em poços águas subterrâneas e oceânicas.

Carga Baixa (20 g) - Variação da Concentração

Os ensaios de menor carga (20 g) ocorreram nos dias 16/09/2014, 14/09/2014 e 15/09/2014, respectivamente para as concentrações de 0%, 2% e 4%. A Figura 4.39-a ilustra um decréscimo na produtividade na ordem de 16,98 mL por cada porcentual de concentração acrescido (-16,98 mL/%C).

Assim, a maior produção foi de 623,2 mL ($5,27 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) de água destilada e a mínima de 555,5 mL ($4,70 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$). A irradiação média nos dias investigados foi de $809 \pm 17 \text{ W.m}^{-2}$, o que correspondeu a uma variação de 2,13%. A produção de água destilada, ao longo do dia, pode ser observada pela Figura 4.39-b e a Figura 4.39-c informa as curvas de produção acumulada ao longo do dia.

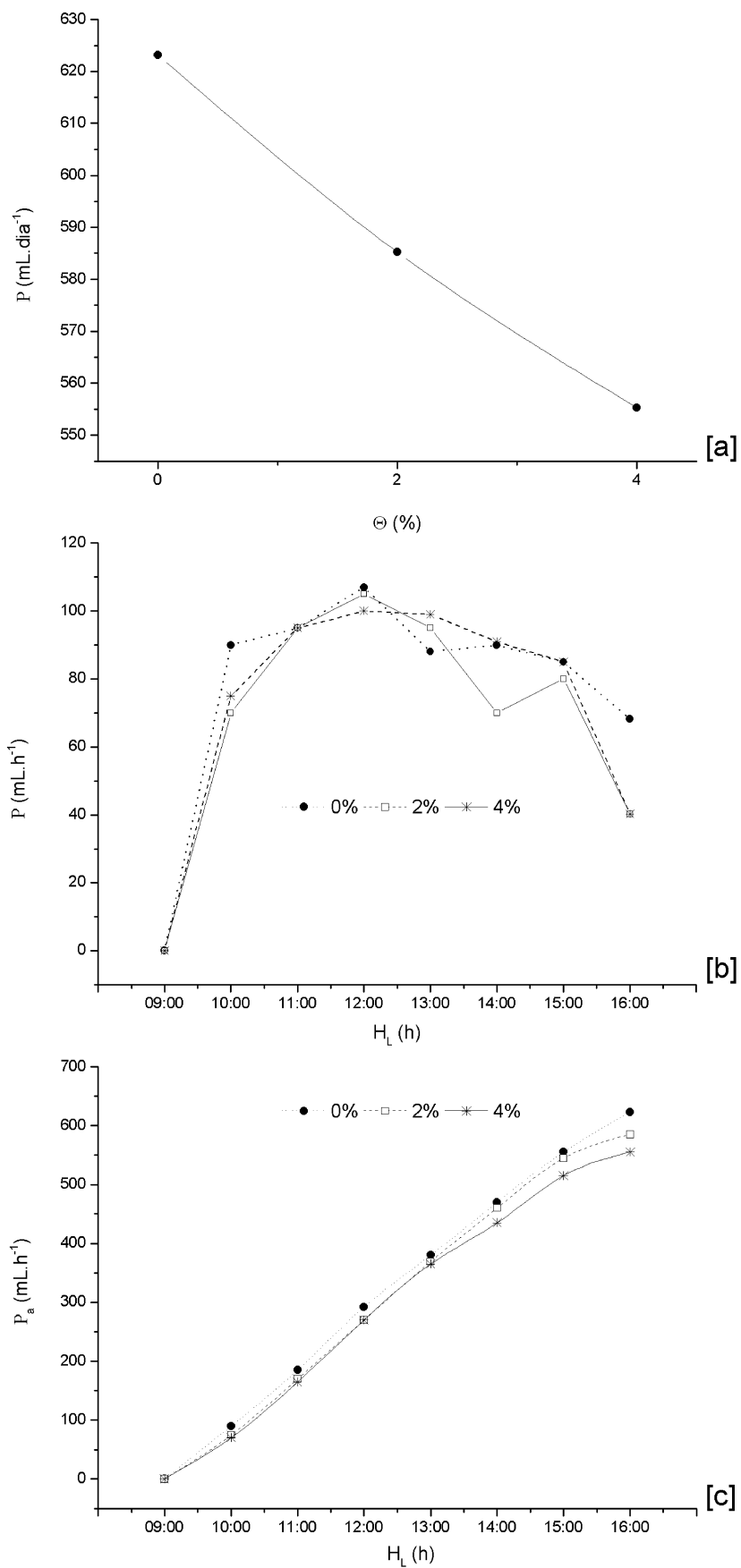


Figura 4.39: Produção de água destilada com uma carga baixa de solução (20 g).

Carga Média (50 g) - Variação da Concentração

Os resultados dos ensaios com carga média (50 g) foram investigados nos dias 29/09/2014, 01/10/2014 e 10/09/2014, respectivamente para as concentrações de 0%, 2% e 4%. Por consequência, a Figura 4.40-a ilustra a produtividade diária que decresceu em 12,50 mL/%C registrando um ponto máximo de 573,4 mL ($4,85 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) de água destilada e um mínimo de 523,4 mL ($4,43 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

A irradiação média nos dias investigados foi de $854 \pm 12 \text{ W.m}^{-2}$, o que correspondeu a uma variação de 1,51%. Em seguida, a Figura 4.40-b que registrou a maior produtividade horária 110 mL.h⁻¹ (2%). A Figura 4.40-c apresenta as produtividades acumuladas ao longo do dia.

Carga Alta (80 g) - Variação da Concentração

Os resultados a seguir dizem respeito aos experimentos com a maior carga (80 g). Os dias investigados foram 12/09/2014, 11/09/2014 e 13/09/2014, respectivamente para as concentrações de 0%, 2% e 4%. Dessa forma, a Figura 4.41-a referencia a produção diária ao longo do dia. Assim, o padrão de produtividade decresceu em 5 mL/%C sendo que a maior produção foi de 542,6 mL ($4,59 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) de água destilada e a menor de 519,8 mL ($4,40 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

A irradiação média nos dias foi de $800 \pm 6 \text{ W.m}^{-2}$, o que correspondeu a uma variação de 0,75%. Comparado com os ensaios anteriores, esses dias tiveram uma irradiação mais uniforme. A produção de água destilada ao longo do dia pode ser visualizada pela Figura 4.41-b.

Neste caso, embora as linhas de produtividade de 0% e 4% confirmassem à tendência curvilínea da irradiação solar ao longo do dia, a produtividade da concentração de 2% apresentou variações na contabilização do destilado devido a uma obstrução na mangueira de resfriamento, o que gerou dificuldades de escoamento. A maior produção (97 mL.h⁻¹) ocorreu entre 11:00 e 12:00 horas no ensaio com concentração de 0% de sal marinho.

Todavia, pela Figura 4.41-c, foi possível constatar que a produção acumulada de água destilada foi muito semelhante entre as três concentrações, o que sugere que com o aumento da carga os efeitos das propriedades coligativas sejam reduzidos.

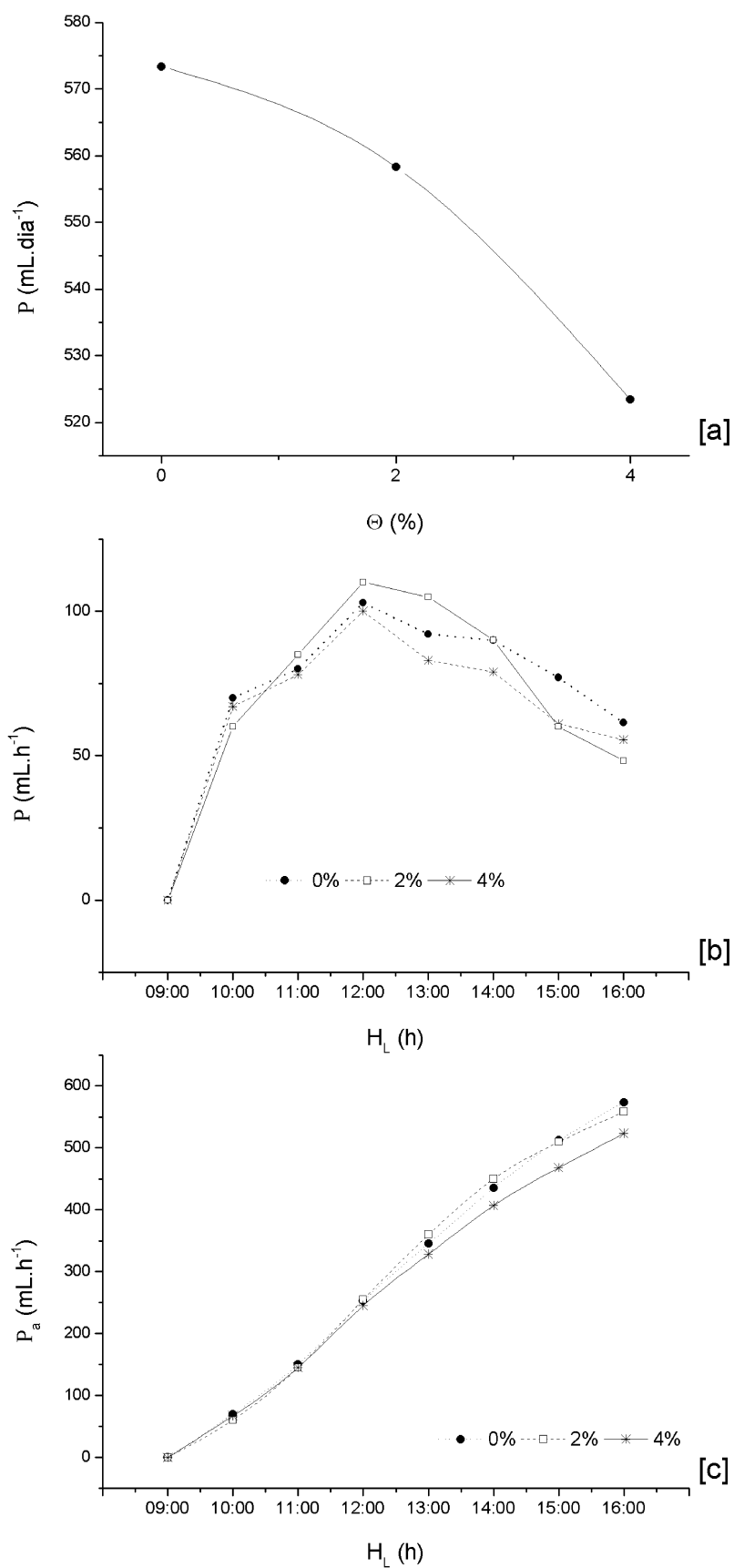


Figura 4.40: Produção de água destilada com uma carga média de solução (50 g).

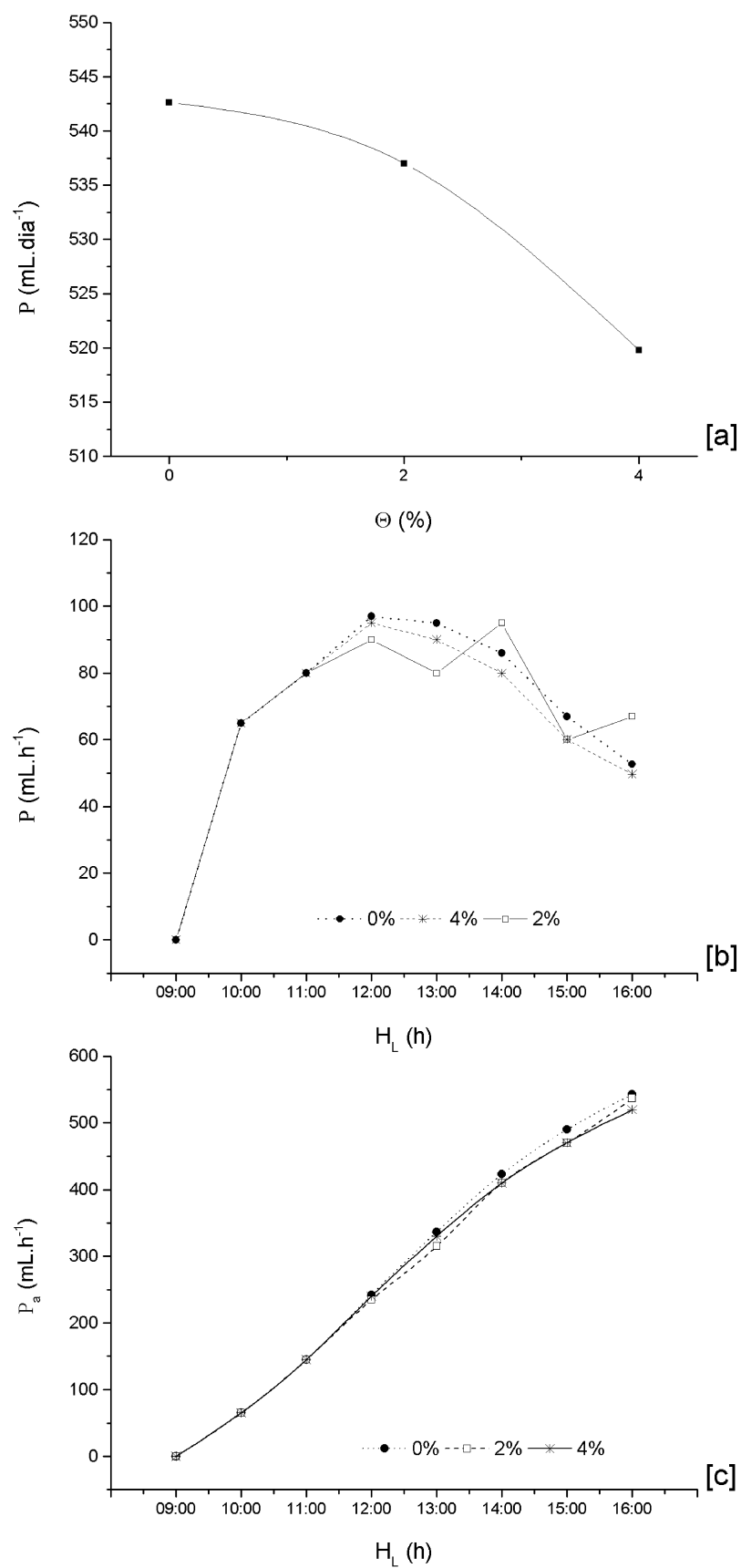


Figura 4.41: Produção de água destilada com uma carga alta de solução (80 g).

Concentração Fixa - Variação de Carga

Os resultados a seguir comparam a produtividade de uma mesma concentração considerando as três cargas analisadas. Consequentemente, a menor carga (20 g), ou nível baixo, foi identificada nas figuras pela letra B, a carga média (50 g), ou nível médio, por M e a maior carga, ou nível alto, pela letra A. Dessa forma, a Figura 4.42 ilustra as produções diárias separando-as por concentrações conforme o tipo da coluna.

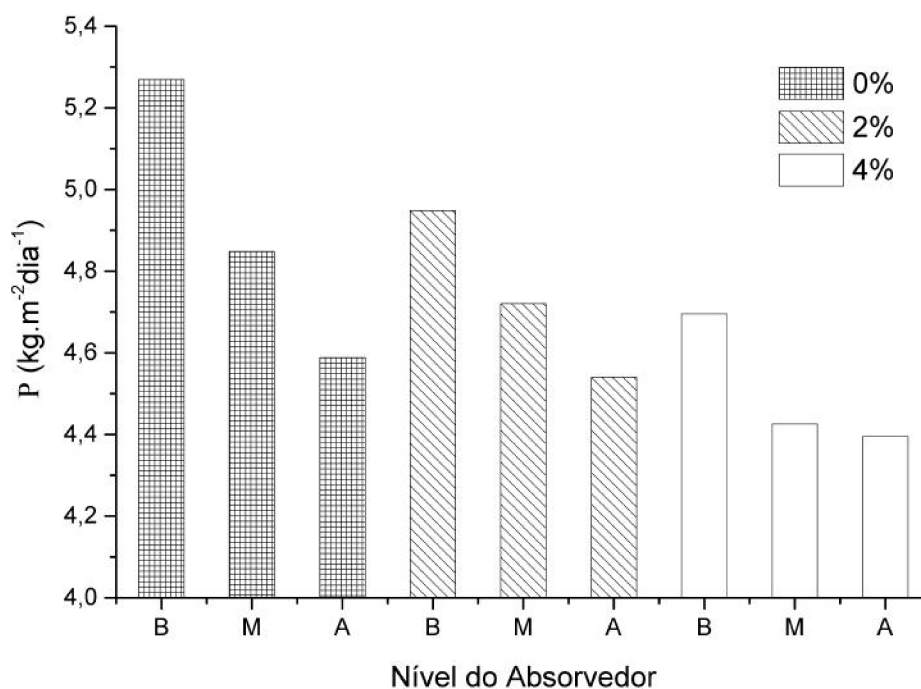


Figura 4.42: Produção de água destilada com concentração fixa e variação de carga.

Os dias investigados para a concentração de 0% foram 16/09/2014, 03/10/2014 e 12/09/2014, respectivamente para os níveis baixo, médio e alto. Assim, à medida que o nível do líquido aumentou a produtividade diminuiu, o que era de se esperar uma vez que é necessário aquecer uma maior quantidade de massa. A maior produção registrada foi de 623,2 mL ($5,27 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e a menor foi de 542,6 mL, cerca de $4,59 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ em unidade de área útil da parábola. A irradiação média nos dias investigados foi de $833 \pm 26 \text{ W.m}^{-2}$, o que correspondeu a uma variação de 3,17%. Assim, a produtividade média foi de 579,75 mL com um desvio padrão de 33,19 mL ou 5,73%.

Na análise seguinte, fez-se uma comparação da solução com 2% de sal marinho, de listras diagonais. Os dias investigados foram 14/09/2014, 04/10/2014 e 11/09/2014, respectivamente para os níveis baixo, médio e alto. De uma forma mais discreta que a anterior, a produção decresceu de 585,2 mL ($4,95 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) para 537,0 mL ($4,54 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

A irradiação média nos dias investigados foi de $818,92 \pm 31 \text{ W.m}^{-2}$, o que correspondeu a uma variação de 3,80%. Enquanto que a produtividade média foi de 560,17 mL com

um desvio padrão de 19,72 mL ou 3,52%. Logo, na concentração de 2%, a influência da carga foi menor que a influência dos ensaios com 0% de sal marinho.

Por fim, foi comparado da solução com 4% de sal marinho. Os dias investigados foram 15/09/2014, 10/09/2014 e 13/09/2014, respectivamente para os níveis baixo, médio e alto. Por conseguinte, a produção diária foi ilustrada na Figura 4.42, pela coluna sem hachuras. A maior produção registrada foi de 555,3 mL ($4,70 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) e a menor foi de 519,8 mL ($4,40 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$).

A irradiação média nos dias investigados foi de $813,16 \pm 17,34 \text{ W.m}^{-2}$, o que correspondeu a uma variação de 2,13%, a menor diferença entre as comparações de nível. Enquanto que a produtividade média foi de 532,83 mL com um desvio padrão de 15,95 mL ou 2,99%. Assim sendo, na concentração de 4%, a influência da carga foi ainda menor que os ensaios com concentrações de 0% e de 2%. A equação empírica desse sistema pode ser visualizada através da Equação (4.3), que representa cerca de 97,64% dos dados (r^2). Sendo que $P(\text{kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1})$ é a produção de água destilada ao longo do dia, X_1 faz referência à concentração e X_2 , diz respeito à carga.

$$P = 5,6044 + [-0,1458 \quad -0,192] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + [X_1 \quad X_2] \begin{bmatrix} -0,0082 & 0,0016/2 \\ 0,0016/2 & 8,29 \cdot 10^{-5} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

No entanto, com o tratamento estatístico através de uma matriz de planejamento fatorial, Tabela 4.4, foi possível a identificação das variáveis significativas desses experimentos e a determinação de uma superfície de repostas com base na produtividade.

Tabela 4.4: Matriz de planejamento fatorial.

Experimento	X_1	X_2	Produtividade ($\text{kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)
1	0 (-1)	20 (-1)	5,27
2	2 (0)	20 (-1)	4,84
3	4 (+1)	20 (-1)	4,56
4	0 (-1)	50 (0)	4,94
5	2 (0)	50 (0)	4,72
6	4 (+1)	50 (0)	4,54
7	0 (-1)	80 (+1)	4,69
8	2 (0)	80 (+1)	4,42
9	4 (+1)	80 (+1)	4,39

Considerando um nível de significância de 10%, somente a influência da interação quadrática da concentração (X_1^2) não foi considerada significativa. Em contrapartida, a

carga, codificada por X_2 foi a variável o que mais influenciou na produtividade, o que pode ser visualizado pela Figura 4.43.

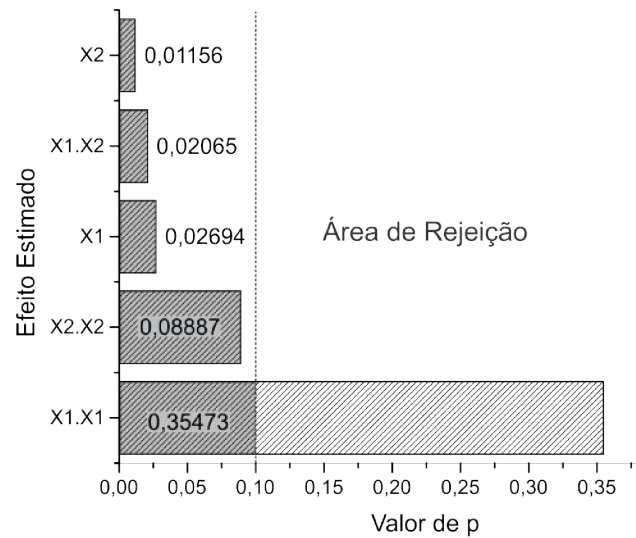


Figura 4.43: Análise das variáveis significativas no processo de dessalinização.

Os efeitos da carga (X_2) e da concentração (1) foram negativos, o que significa que menores valores geram maiores produtividades. Conquanto, os valores da interação entre a carga e a concentração ($X_1.X_2$) e da quadrática da carga (X_2^2) foram positivos.

A superfície de resposta da Figura 4.44 é o resultado da Equação (4.3) complementada pelas curvas de contorno. Assim, rendimentos acima de $5,0 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ foram verificados à partir de uma carga mássica de 40 gramas através de uma concentração de 2,5% de sal marinho. Porém, considerando a concentração de sal média dos oceanos, ou seja, 3,5% a produtividade esteve na faixa de $4,4 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ até $4,75 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, aproximadamente. Logo, determinou-se a condição operacional mais favorável identificada pela redução dos valores da concentração e da carga.

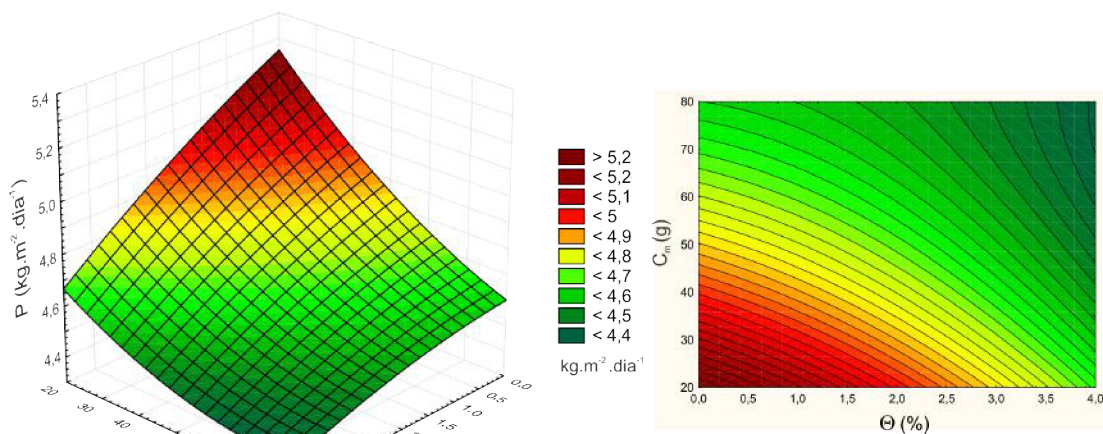


Figura 4.44: Superfície de resposta e curva de contorno para produtividade.

Por conseguinte, a produção de água destilada, em todas as concentrações, superou a $4 \text{ L.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Segundo Campos (2013), um ser humano, em condições normais, necessita de 25 a 35 mL.kg^{-1} o que equivale, para uma pessoa de 70 kg, ingerir aproximadamente 2 L.dia^{-1} . Assim sendo, um sistema com 1 m^2 foi capaz de saciar a sede de uma família com duas pessoas, ou seja, esse dispositivo pode ser indicado para residências e pequenas comunidades.

O presente capítulo apresentou os resultados envolvendo o planejamento, a construção e a análise do desempenho dos concentradores solares de disco e da lente de fresnel. O capítulo seguinte apresentará as conclusões e sugestões envolvidas nesse trabalho.

CAPÍTULO 5

Conclusão e Sugestões

Considerando que esse trabalho teve como objetivo principal a utilização da energia solar para dessalinizar água a partir da utilização de concentradores solares, dos tipos disco (CSD) e Lente de Fresnel (CSLF), a seguir são apresentadas as principais conclusões.

Na parte do planejamento da unidade, um estudo teórico considerando conceitos de óptica geométrica e de transferência de calor foi realizado para verificar os potenciais das superfícies quanto ao fator de interceptação dos raios solares através da elaboração de um algoritmo. Logo, foi possível quantificar a porcentagem dos raios que atingiam a superfície refletora e que eram direcionados para o absorvedor, em quatro funções matemáticas, através do fator de interceptação. Na configuração plana, foram apenas 7,62%, na curvatura circunferencial 72,57%, na superfície senoidal 79,28% e na parabólica foi possível convergir 100%.

Embora esse fator de interceptação tenha variado conforme a superfície, todas elas poderiam ser adequadas para que o absorvedor interceptasse 100% dos raios solares. No caso do modelo plano, o ajuste mudaria o formato do absorvedor de circunferencial para retangular. Já na curvatura circunferencial, o aumento do raio de 1,5 m para 2,4 m seria suficiente para captar todos os raios refletidos. Uma outra possibilidade seria a mudança no formato do absorvedor para um tipo cilíndrico. Na configuração senoidal, a adição de uma segunda superfície refletora bastaria para uma captação total. No entanto, como a curvatura parabólica obteve uma interceptação total dos raios refletidos, ela foi a referência selecionada para a construção.

Antes que os concentradores solares fossem adaptados de uma antena de satélite parabólica e de uma Lente de Fresnel de um retroprojeto, foi proposto um modelo fenome-

nológico para verificar a temperatura de equilíbrio possível do sistema. Logo, foi feito um balanço de energia em dois corpos de prova que, em situação de idealidade, atingiram mais de 320°C. Com isso, o sistema atenderia ao propósito de dessalinização o qual necessitaria atingir aproximadamente 100°C.

Na parte da construção dos dispositivos, dois protótipos foram fabricados e acoplados em um tripé com fins astrofotográficos, adaptado para o rastreamento solar. A unidade rastreadora foi apontada utilizando as coordenadas da Ascensão Reta e da Declinação oriundas de um algoritmo implementado em Scilab o que resultou em um direcionamento preciso. Além do rastreador, os concentradores tinham em comum um sistema de condensação, um sistema de ajuste focal e o contrapeso do absorvedor. Todos eles foram elaborados e construídos na oficina mecânica do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

A implementação de um contrapeso no absorvedor foi necessária devido ao deslocamento que o evaporador realizava ao longo do experimento, o que gerava contaminação do destilado por solução salina. A solução adotada foi eficaz. No que diz respeito à superfície do concentrador solar de disco, o espelhamento através do processo de cromação foi eficiente, no entanto, percebeu-se que pequenas imperfeições na curvatura foram capazes de diminuir o fator de interceptação.

Uma vez construída, as unidades experimentais foram caracterizadas através dos seguintes parâmetros: distância focal, índice de concentração, ângulos limite e de borda, fator de interceptação, eficiência óptica e térmica. O CSD apesar de possuir uma região focal mais dispersa, obteve melhores resultados de interceptação e consequentemente de eficiência óptica e de eficiência térmica quando comparados com o CSLF. Essa maior dispersão do CSD também possibilitou um maior ângulo limite, o que representa uma tolerância, sem o rastreamento solar, de aproximadamente 19 min. Como consequência, foi cerca de 52% mais eficiente que o CSLF.

A dinâmica de aquecimento foi proposta experimentalmente e por simulação à fim de se determinar a rampa de aquecimento e a temperatura de equilíbrio real dos protótipos. A maior temperatura atingida foi de 319°C e, considerando uma faixa até 100°C, a rampa de aquecimento chegou a 75,56°C.min⁻¹. No entanto se a referência foi a temperatura de equilíbrio esses valores foram 20,50°C.min⁻¹. A dinâmica proposta através da simulação computacional foi validada experimentalmente e os resultados foram considerados representativos.

Os experimentos envolvendo a dessalinização foram investigados alimentando o evaporador com uma solução de 0%, 1%, 2%, 3% e 4% de sal marinho. Os melhores resultados foram da solução isenta de sal marinho com uma produtividade de 4,95 kg.m⁻².dia⁻¹

para o CSD e $5,40 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ para o CSLF. Considerando uma solução de 4% de sal marinho a produção de água destilada foi de $4,11 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e $5,06 \text{ kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ respectivamente para o CSD e o CSLF. Portanto, nas faixas de salinidade que classificam a água como doce, salobra ou salgada as unidades experimentais propostas tiveram uma produção suficiente para saciar a sede diária de pelo menos dois adultos.

O sistema de condensação foi considerado eficiente para os dois concentradores, por resfriar a água destilada em mais de 62%, atingindo uma temperatura final de aproximadamente 35°C , valor próximo à temperatura ambiente do dia. Um planejamento fatorial de três níveis e duas variáveis (3^2) foi realizado com o objetivo de quantificar e de traçar uma superfície de resposta referente a variação de concentração e de carga mássica. Esse tratamento estatístico demonstrou matematicamente uma região de resposta ótima no que se refere a produção de água destilada quando a carga mássica e a concentração estavam com os valores mais baixos. O que é plausível pois uma carga mássica menor demanda uma quantidade de energia menor para evaporar e uma solução com menos soluto, possui mais facilidade para atingir o ponto de ebulição.

Assim, a partir das observações experimentais e teóricas desse trabalho pôde-se elaborar as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- construção de uma superfície concentradora com um fator de interceptação mais próximo da idealidade;
- construção de um sistema de dessalinização com um concentrador solar fixo, ampliando o ângulo limite;
- alimentação do sistema utilizando gravidade como força de escoamento;
- produção de vapor para fins energéticos;
- utilização do absorvedor como reator, sendo utilizado em reações que demandam energia térmica, tal qual a pirólise;
- implementação de um sistema de resfriamento via absorção utilizando a energia solar.

Portanto, foi possível planejar, construir e caracterizar um sistema de dessalinização utilizando concentradores solares. Com base em sua performance, têm-se como indicação a possibilidade de utilização desses equipamentos em lugares litorâneos ou providos com poços artesianos, seja de água salobra ou salgada. Por manter a temperatura de ebulição constantemente, e utilizar a faixa do espectro UV, pode ser utilizado como um desinfetante de águas. Esses protótipos, atendem a uma demanda local de regiões com

céu predominantemente sem nuvens e pode ser aplicado a comunidades de baixa renda utilizado um sistema de rastreamento hidráulico ou por molas e com uma alimentação gravitacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFFHOLDER, M.; VALIRON, F. *Descriptive Physical Oceanography*. [S.l.]: CRC Press, 2001.
- AL-KHARABSHEH, S.; GOSWAMI, D. Y. Experimental study of an innovative solar water desalination system utilizing a passive vacuum technique. *Solar Energy*, v. 75, p. 395–401, 2003.
- AL-SULAIMAN, F. A. *et al.* Humidification dehumidification desalination system using parabolic trough solar air collector. *Applied Thermal Engineering*, v. 75, n. 0, p. 809 – 816, 2014. ISSN 1359-4311.
- ALMOROX, J.; BENITO, M.; HONTORIA, C. Estimation of global solar radiation in venezuela. *INCI*, v. 33, 2008.
- ANTIA, H.; CHITRE, S. Helioseismic bounds on the central temperature of the sun. *The Astrophysical Journal*, v. 442, n. 1, p. 434–445, 03 1995.
- ARUNKUMAR, T.; DENKENBERGER, D.; AHSAN, A.; JAYAPRAKASH, R. The augmentation of distillate yield by using concentrator coupled solar still with phase change material. *Desalination*, v. 314, n. 0, p. 189 – 192, 2013. ISSN 0011-9164.
- ASADI, R. Z.; SUJA, F.; RUSLAN, M. H.; JALIL, N. A. The application of a solar still in domestic and industrial wastewater treatment. *Solar Energy*, v. 93, n. 0, p. 63 – 71, 2013. ISSN 0038-092X.
- ATKINS, P.; PAULA, J. de. *Physical Chemistry for the life sciences*. New York: W. H. Freeman & Company, 2011.
- ATKINS, P. W.; JONES, L. *Chemical Principles*. New York: W.H. Freeman, 2010.
- BAKOS, G.; ANTONIADES, C. Techno-economic appraisal of a dish/stirling solar power plant in greece based on an innovative solar concentrator formed by elastic film. *Renewable Energy*, v. 60, p. 446 – 453, 2013. ISSN 0960-1481.

- BALGHOUTH, M.; ALI, A. B. H.; TRABELSI, S. E.; GUIZANI, A. Optical and thermal evaluations of a medium temperature parabolic trough solar collector used in a cooling installation. *Energy Conversion and Management*, v. 86, p. 1134 – 1146, 2014. ISSN 0196-8904.
- BAUER, T. *et al.* Material aspects of solar salt for sensible heat storage. *Applied Energy*, v. 111, p. 1114 – 1119, 2013. ISSN 0306-2619.
- BEZERRA, A. M. *Aplicações térmicas da energia solar*. João Pessoa: Editora Universitária, 1998.
- BIRDI, K. *Handbook of Surface and Colloid Chemistry*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis, 2009.
- BORN, M.; WOLF, E. *Principles of Optics*. 5th. ed. New York and Oxford: Pergamon Press, 1975.
- BREEZE, P. *Power Generation Technologies*. Burlington: Newnes, 2005.
- BRYANT, E. *Climate Process and Change*. Cambridge;New York: Cambridge University Press, 1997.
- BUTCHER, G. *NASA: Mysteries of the Sun*. Washington: NASA Science, 2012.
- CAMPOS, A. C. L. *Tratado de Nutricao e Metabolismo em Cirurgia*. Rio de Janeiro: Editora Rubio, 2013.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. *Transferência de calor e de massa*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- CHAVES, J. *Introduction to Nonimaging Optics*. Boca Raton (FL): CRC Press, 2008.
- CHEN, C. J. *Physics of Solar Energy*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- CHONG, K.; CHAY, K.; CHIN, K. Study of a solar water heater using stationary v-trough collector. *Renewable Energy*, v. 39, n. 1, p. 207 – 215, 2012. ISSN 0960-1481.
- COOPER, P. I. The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, v. 12, p. 3, 1969.
- CWT, C. W. T. Electrical conductivity/salinity fact sheet. *The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment.*, 2004. Disponível em: <http://www.swrcb.ca.gov/water_issues/>.
- DANIELS, F. *Uso directo de la energia solar*. Madrid: [s.n.], 1980.
- DELYANNIS, E. Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*, v. 75, p. 357–366, 2003.

- DERSCH, J.; VOGEL, T.; POLKLAS, T.; TÜMMERS, C. Solar-only parabolic trough plants with high steam parameters. *Energy Procedia*, v. 49, n. 0, p. 1117 – 1126, 2014. ISSN 1876-6102. Proceedings of the SolarPACES 2013 International Conference.
- DINCER, I.; ZAMFIRESCU, C. *Advanced Power Generation Systems*. London, UK ; Amsterdam, The Netherlands ; Waltham, MA: Elsevier Science, 2014.
- DOMINGO, V. Soho, its day in the sun. *Advances in Space Research*, v. 20, n. 4-5, p. 581 – 594, 1997. ISSN 0273-1177. Results of the {IASTP} Program.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken: Jonh Wiley, 2013.
- EIA. *International energy Outlook*. 11 2014. 2013. Disponível em: <<http://www.eia.gov/>>.
- EIBLING, J. A.; THOMAS, R. E.; LANDRY, B. A. An investigation of multiple-effect evaporation of saline waters by steam from solar radiation. *USDI office of saline water*, v. 2, 1953.
- EL-AGOUZ, S. Experimental investigation of stepped solar still with continuous water circulation. *Energy Conversion and Management*, v. 86, n. 0, p. 186 – 193, 2014. ISSN 0196-8904.
- EL-AGOUZ, S.; EL-AZIZ, G. A.; AWAD, A. Solar desalination system using spray evaporation. *Energy*, v. 76, n. 0, p. 276 – 283, 2014. ISSN 0360-5442. {SDEWES} 2013: Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.
- EL-BAHI, D. I. A. A solar still with minimum inclination, coupled to an outside condenser. *Desalination*, v. 123, p. 79–83, 1999.
- ELSAFTY, A. F.; ABBAS, M. M. Experimental investigation for a new solar desalination system. *Energy Procedia*, v. 36, n. 0, p. 676 – 686, 2013. ISSN 1876-6102. TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment.
- ERDÉLYI.; BALLAI, I. Heating of the solar and stellar coronae: a review. *Astronomische Nachrichten*, WILEY-VCH Verlag, v. 328, n. 8, p. 726–733, 2007. ISSN 1521-3994.
- FANG, D.; WANG, X. H.; WANG, F.; LIU, S. N. Solar pumped nd:yag laser. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, v. 124, n. 18, p. 3367 – 3370, 2013. ISSN 0030-4026.

- FARAHBOD, F.; MOWLA, D.; NASR, M. J.; SOLTANIEH, M. Experimental study of a solar desalination pond as second stage in proposed zero discharge desalination process. *Solar Energy*, v. 97, n. 0, p. 138 – 146, 2013. ISSN 0038-092X.
- FAROOQUI, S. Z. A gravity based tracking system for box type solar cookers. *Solar Energy*, v. 92, n. 0, p. 62 – 68, 2013. ISSN 0038-092X. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13000893>>.
- FEGLEY, B. *Practical Chemical Thermodynamics for Geoscientists*. Amsterdam: Elsevier/AP, 2013.
- FILHO, K. de S. O.; SARAIVA, M. de F. O. *Astronomia e astrofísica*. São Paulo: Editora Livraia da Física, 2004.
- FIX, J. D. *Astronomy : journey to the cosmic frontier*. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2004.
- FOSTER, R.; GHASSEMI, M.; COTA, A. *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. Boca Rato: CRC, 2009.
- FRANCHINI, G.; PERDICHIZZI, A. Modeling of a solar driven hd (humidification-dehumidification) desalination system. *Energy Procedia*, v. 45, n. 0, p. 588 – 597, 2014. ISSN 1876-6102. {ATI} 2013 - 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association.
- GARCIA, R. A. *et al.* Tracking solar gravity modes: The dynamics of the solar core. *Science*, v. 316, n. 5831, p. 1591–1593, June 2007.
- GARG, H. P.; PRAKASH, J. *Solar Energy Fundamentals and Applications*. Delphi: McGraw Hill, 2000.
- GHOSH, T. K.; PRELAS, M. A. *Energy Resources and Systems*. London, New York: Springer, 2011.
- GONZÁLEZ-PARDO, A.; RODRÍGUEZ, A.; GONZÁLEZ-AGUILAR, J.; ROMERO, M. Analysis of solar shading caused by building-integrated vertical heliostat fields. *Energy and Buildings*, v. 76, n. 0, p. 199 – 210, 2014. ISSN 0378-7788.
- GORJIAN, S.; GHOBADIAN, B.; HASHJIN, T. T.; BANAKAR, A. Experimental performance evaluation of a stand-alone point-focus parabolic solar still. *Desalination*, v. 352, n. 0, p. 1 – 17, 2014. ISSN 0011-9164.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de Física - Óptica e Física Moderna*. 9. ed. São Paulo: LTC Editora S.A, 2012.

- HARMIM, A.; MERZOUK, M.; BOUKAR, M.; AMAR, M. Mathematical modeling of a box-type solar cooker employing an asymmetric compound parabolic concentrator. *Solar Energy*, v. 86, n. 6, p. 1673 – 1682, 2012. ISSN 0038-092X.
- HELAL, A.; AL-MALEK, S. Design of a solar-assisted mechanical vapor compression (mvc) desalination unit for remote areas in the uae. *Desalination*, v. 197, p. 273–300, 2006.
- HILLS, D. M.; SADAVA, D. E.; BERENBAUM, M. *Life: The Science of Biology*. SunderlandHemus, MA: Sinauer Associates, 2013.
- HORVATH, J. E. *O ABCD da Astronomia e Astrofísica*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.
- HUANG, W.; HU, P.; CHEN, Z. Performance simulation of a parabolic trough solar collector. *Solar Energy*, v. 86, n. 2, p. 746 – 755, 2012. ISSN 0038-092X.
- HUBER, P. C. M. E. *Biologia Marinha*. 8. ed. Blacklick, Ohio: McGraw Hill, 2012.
- IBGE. *Brasil em Números*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013.
- INCROPERA, F.; DEWITT, D. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A, 2014.
- JARAMILLO, O. *et al.* Parabolic trough concentrators for low enthalpy processes. *Renewable Energy*, v. 60, n. 0, p. 529 – 539, 2013. ISSN 0960-1481.
- KALOGIROU, S. A. Design of a new spray-type seawater evaporator. *Desalination*, v. 139, p. 345–352, 2001.
- KALOGIROU, S. A. Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 31, p. 242–281, 2005.
- KALOGIROU, S. A. *Solar Energy Engineering*. Burlington, MA: Academic Press, 2009.
- KLEIN, S. A. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar Energy*, v. 19, p. 325, 1977.
- KÜNNEMEYER, R.; ANDERSON, T.; DUKE, M.; CARSON, J. Performance of a v-trough photovoltaic/thermal concentrator. *Solar Energy*, v. 101, n. 0, p. 19 – 27, 2014. ISSN 0038-092X.
- KREIDER, J. F.; KREITH, F. *Solar Energy handbook*. New York: McGraw-Hill, 1981.

- KREITH, F.; KREIDER, J. F. *Principles of Sustainable Energy*. Boca Raton (FL): CRC Press, 2011.
- LEUTZ, R.; SUZUKI, A. *Nonimaging Fresnel Lenses: design and performance of solar concentrators*. Berlin; New York: Springer, 2001.
- LI, H. *et al.* Optical analysis and optimization of parabolic dish solar concentrator with a cavity receiver. *Solar Energy*, v. 92, n. 0, p. 288 – 297, 2013a. ISSN 0038-092X.
- LI, X.; DAI, Y.; LI, Y.; WANG, R. Comparative study on two novel intermediate temperature {CPC} solar collectors with the u-shape evacuated tubular absorber. *Solar Energy*, v. 93, n. 0, p. 220 – 234, 2013b. ISSN 0038-092X.
- LIDE, D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton (FL): Boca Raton (FL), 2008.
- LIN, M.; SUMATHY, K.; DAI, Y.; ZHAO, X. Performance investigation on a linear fresnel lens solar collector using cavity receiver. *Solar Energy*, v. 107, n. 0, p. 50 – 62, 2014. ISSN 0038-092X.
- LIU, Z.; LAPP, J.; LIPINSKI, W. Optical design of a flat-facet solar concentrator. *Solar Energy*, v. 86, n. 6, p. 1962 – 1966, 2012. ISSN 0038-092X.
- LIU, Z.-H.; GUAN, H.-Y.; WANG, G.-S. Performance optimization study on an integrated solar desalination system with multi-stage evaporation/heat recovery processes. *Energy*, v. 76, n. 0, p. 1001 – 1010, 2014. ISSN 0360-5442. {SDEWES} 2013: Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.
- LOVEGROVE, K.; BURGESS, G.; PYE, J. A new 500m² paraboloidal dish solar concentrator. *Solar Energy*, v. 85, n. 4, p. 620 – 626, 2011. ISSN 0038-092X. SolarPACES 2009.
- LOVEGROVE, K.; STEIN, W. *Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications*. Philadelphia: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- MADANI, A. A. Zero-discharge direct-contact freezing/solar evaporator desalination complex. *Desalination*, v. 85, p. 179–195, 1992.
- MAHDI, J.; SMITH, B.; SHARIF, A. An experimental wick-type solar still system: Design and construction. *Desalination*, v. 267, n. 2-3, p. 233 – 238, 2011. ISSN 0011-9164.
- MAHMOUD, M. S.; FARRAG, T. E.; MOHAMED, W. A. Experimental and theoretical model for water desalination by humidification - dehumidification (hdh). *Procedia Environmental Sciences*, v. 17, n. 0, p. 503 – 512, 2013. ISSN 1878-0296. The 3rd

-
- International Conference on Sustainable Future for Human Security, {SUSTAIN} 2012, 3-5 November 2012, Clock Tower Centennial Hall, Kyoto University, {JAPAN}.
- MCFADDEN, L.-A.; WEISSMAN, P. R.; JOHNSON, T. V. *Encyclopedia of the solar system*. 2. ed. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2007.
- MCGUIGAN, K. G. *et al.* Solar water disinfection (sodis): A review from bench-top to roof-top. *Journal of Hazardous Materials*, v. 235-236, n. 0, p. 29 – 46, 2012. ISSN 0304-3894.
- MEI, Z.; HONG-QI, Z. Observation of the chromospheric magnetic field of quiet-sun regions. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, v. 25, n. 2, p. 229 – 234, 2001. ISSN 0275-1062.
- MICHEL, C.; LOICQ, J.; LANGUY, F.; HABRAKEN, S. Optical study of a solar concentrator for space applications based on a diffractive/refractive optical combination. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 120, Part A, n. 0, p. 183 – 190, 2014. ISSN 0927-0248.
- MIRANDA, L. B. de; CASTRO, B. M. de; KJERFVE, B. *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. São Paulo: Editora EDUSP, 2002.
- MOHAMED, A.; EL-MINSHAWY, N. Theoretical investigation of solar humidification-dehumidification desalination system using parabolic trough concentrators. *Energy Conversion and Management*, v. 52, n. 10, p. 3112 – 3119, 2011. ISSN 0196-8904.
- MWESIGYE, A.; BELLO-OCHEDE, T.; MEYER, J. Numerical investigation of entropy generation in a parabolic trough receiver at different concentration ratios. *Energy*, v. 53, p. 114–127, 2013.
- NIA, M. H. *et al.* Cogeneration solar system using thermoelectric module and fresnel lens. *Energy Conversion and Management*, v. 84, n. 0, p. 305 – 310, 2014. ISSN 0196-8904.
- NOAA. *World Magnetic Model*. 12 2014.
- NOAA. *Magnetic Field Calculators*. 12 2015. Disponível em: <<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml>>.
- OMARA, Z.; ELTAWIL, M. A. Hybrid of solar dish concentrator, new boiler and simple solar collector for brackish water desalination. *Desalination*, v. 326, n. 0, p. 62 – 68, 2013. ISSN 0011-9164.
- PALENZUELA, P.; HASSAN, A. S.; ZARAGOZA, G.; ALARCAN-PADILLA, D.-C. Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma solar de almeria med pilot plant. *Desalination*, v. 337, n. 0, p. 31 – 42, 2014. ISSN 0011-9164.

- PALIK, E. D. *Handbook of Optical Constants of Solid*. Boston: Academic Press, 1997.
- PALZ, W. *Energia solar e fontes alternativas*. Curitiba, PR: Hemus, 2002. Tradução: Norberto de Paula Lima ; revisão: Nilza Agua.
- PAREKH, S.; FARID, M.; SELMAN, J.; AL-HALAJ, S. Solar desalination with a humidification-dehumidification technique-a comprehensive technical review. *Desalination*, v. 160, p. 167–186, 2004.
- PITZ-PALL, R.; BOTERO, N.; STEINFELD, A. Heliostat field layout optimization for high-temperature solar thermochemical processing. *Solar Energy*, v. 85, p. p. 334–343, 2011.
- PONTIEU, B. D.; ERDELYI, R.; JAMES, S. P. Solar chromospheric spicules from the leakage of photospheric oscillations and flows. *Nature*, v. 430, n. 6999, p. 536–539, jul. 2004. ISSN 0028-0836.
- REDDY, K.; MALLICK, T. K.; VIKRAM, T. S.; SHARON, H. Design and optimisation of elliptical hyperboloid concentrator with helical receiver. *Solar Energy*, v. 108, n. 0, p. 515 – 524, 2014. ISSN 0038-092X.
- REICHL, C.; HENGSTBERGER, F.; ZAUNER, C. Heat transfer mechanisms in a compound parabolic concentrator: Comparison of computational fluid dynamics simulations to particle image velocimetry and local temperature measurements. *Solar Energy*, v. 97, n. 0, p. 436 – 446, 2013. ISSN 0038-092X.
- RIFFAT, S.; MAYERE, A. Performance evaluation of v-trough solar concentrator for water desalination applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 50, n. 1, p. 234 – 244, 2013. ISSN 1359-4311.
- ROCA, L.; CALLE, A. de la; YEBRA, L. J. Heliostat-field gain-scheduling control applied to a two-step solar hydrogen production plant. *Applied Energy*, v. 103, n. 0, p. 298 – 305, 2013. ISSN 0306-2619.
- ROSA, A. V. da. *Fundamentals of Renewable Energy Processes*. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- RYAN, T. P. *Estatística moderna para engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- SACKMANN, J.; BOOTHROYD, A. I.; KRAEMER, K. E. Our sun. i. present and future. *The Astrophysical Journal*, v. 418, p. 457–468, 1993.
- SANTORI, E. Solar still versus solar evaporator: A comparative study between their thermal behaviors. *Solar Energy*, v. 56, n. 2, p. 199–206, 1996.

- SCHLYTER, P. *Computing planetary positions - a tutorial with worked examples*. 05 2014. Disponível em: <<http://www.stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>>.
- SETHI, V.; PAL, D.; SUMATHY, K. Performance evaluation and solar radiation capture of optimally inclined box type solar cooker with parallelepiped cooking vessel design. *Energy Conversion and Management*, v. 81, p. 231 – 241, 2014. ISSN 0196-8904.
- SHARON, H.; REDDY, K. A review of solar energy driven desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 1080–1118, 2015.
- SMIRNOV, C. L. B. S. N. Why is water blue? *Jornal of Chemical Education*, v. 70, n. 8, p. 612, 1993.
- SOUTH-PAUL, J. E.; MATHNY, S. C.; LEWIS, E. L. *CURRENT: Medicina de família e comunidade*. 3 edição. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2014.
- STOLL, G. *World Book Map*. 07 2014. Disponível em: <<http://www.georgestollmaps.com/>>.
- STUBER, M. D. *et al.* Pilot demonstration of concentrated solar-powered desalination of subsurface agricultural drainage water and other brackish groundwater sources. *Desalination*, v. 355, n. 0, p. 186 – 196, 2015. ISSN 0011-9164.
- SUKHATME, S. P.; NAYAK, J. K. *Solar Energy Principles of Thermal Collection and Storage*. New Delphi: Tata McGraw-Hill, 2008.
- SUN, F. *et al.* Optical performance of a heliostat in the dahan solar power plant. *Energy Procedia*, v. 49, n. 0, p. 239 – 248, 2014. ISSN 1876-6102. Proceedings of the Solar-PACES 2013 International Conference.
- SZOKOLAY, S. V. *Energia Solar y edificacion*. Barcelona: [s.n.], 1979.
- TALBERT, S. G.; EIBLING, J. A.; LOF, G. O. G. *Manual on solar distillation of saline water*. Washington: U. S. Department of the Interior, 1970.
- TANAKA, H. Tilted wick solar still with flat plate bottom reflector. *Desalination*, v. 273, n. 273, p. 405 – 413, 2011. ISSN 0011-9164.
- TAO, T.; HONGFEI, Z.; KAIYAN, H.; MAYERE, A. A new trough solar concentrator and its performance analysis. *Solar Energy*, v. 85, n. 1, p. 198 – 207, 2011. ISSN 0038-092X.
- THOMPSON, J. C.-D. D. G. M. The depth of the solar convection zone. *The Astrophysical Journal*, v. 378, n. 1, p. 413–437, September 1991.

- TIBA, C. *Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos*. Recife: Ed. Universitária, 2000.
- TLATOV, A. G. *et al.* Properties of sunspot umbrae of leading and trailing polarity in 1917-2013. *Advances in Space Research*, n. 0, p. –, 2014. ISSN 0273-1177.
- ULAVI, T.; HEBRINK, T.; DAVIDSON, J. H. Analysis of a hybrid solar window for building integration. *Solar Energy*, v. 105, n. 0, p. 290 – 302, 2014. ISSN 0038-092X.
- VILLEDA-MUÑOZ, G. *et al.* Clay-brick firing in a high-temperature solar furnace. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, v.12, p. p. 395–408, 2011.
- VINEIS, P.; CHAN, Q.; KHAN, A. Climate change impacts on water salinity and health. *Journal of Epidemiology and Global Health*, v. 1, n. 1, p. 5 – 10, 2011. ISSN 2210-6006.
- VOET, D.; VOET, J. G.; PRATT, C. W. *Fundamentals of biochemistry : life at the molecular level*. 4. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2013.
- WALLERSTEIN, G. *et al.* Synthesis of the elements in stars: forty years of progress. *Reviews of Modern Physics*, v. 69, p. 995–1084, 1999.
- WAMBEKE, J. V. *Terra e Águas*. 03 2007. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/main/indexesp.stm>>.
- WEBB, D. F.; HOWARD, R. A. The solar cycle variation of coronal mass ejections and the solar wind mass flux. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 99, n. A3, p. 4201–4220, 1994. ISSN 2156-2202.
- WELFORD, W. T.; WINSTON, R. *The Optics of Non-imaging Concentrators*. New York: Academic Press, 1978.
- N.W. Wheeler e W.W. Evans. *Evaporating and distilling with solar heat*. 1870. 102.633.
- WINSTON, R.; MIÑANO, J. C.; BENÍTEZ, P. *Nonimages Optics*. San Diego, California: Elsevier, 2005.
- WU, J. *et al.* Experimental implementation and validation of thermodynamic cycles of adsorption-based desalination. *Applied Energy*, v. 98, p. 190–197, 2012.
- XIE, W.; DAI, Y.; WANG, R. Thermal performance analysis of a linear collector using diferente cavity receivers. *Solar Energy*, v. 91, p. p. 242–255, 2013.
- XIE, W.; DAI, Y.; WANG, R.; SUMATHY, K. Concentrated solar energy applications using fresnel lenses: A review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, v. 15, p. p. 2588–2606, 2011.

- XU, Q. *et al.* Performance comparison of solar parabolic trough system with glass and film reflector. *Energy Conversion and Management*, v. 85, n. 0, p. 581 – 590, 2014. ISSN 0196-8904.
- ZAMFIRESCU, C.; DINCER, I. Assessment of a new integrated solar energy system for hydrogen production. *Solar Energy*, v. 107, n. 0, p. 700 – 713, 2014. ISSN 0038-092X.
- ZANG, C.; GONG, B.; WANG, Z. Experimental and theoretical study of wind loads and mechanical performance analysis of heliostats. *Solar Energy*, v. 105, n. 0, p. 48 – 57, 2014. ISSN 0038-092X.
- ZUO, L.; ZHENG, Y.; LI, Z.; SHA, Y. Solar chimneys integrated with sea water desalination. *Desalination*, 2011.

APÊNDICE A

Algoritmo de Rastreamento Solar

A.1 Descrição da Função

A implementação do algoritmo de rastreamento solar serviu para o apontamento da unidade. A seguir, serão apresentados como referência os valores numéricos resultantes desse equacionamento, considerando como data e horário de verificação o dia 30/06/2002 às 14:00h do padrão UTC.

A Equação (3.24), computa a escala de tempo. Por se tratar de um cálculo fundamental ela será solucionada por etapas à fim de se evitar dúvidas quanto à interface das frações:

$$D = 367 * 2002 - (7 * (2002 + ((6 + 9)/12)))/4 + (275 * 6/9) + 30 - 730530$$

$$D = 734734 - (7 * (2002 + (15/12)))/4 + (1650/9) + 30 - 730530$$

$$D = 734734 - (7 * (2002 + 1)/4) + 183 + 30 - 730530$$

$$D = 734734 - (7 * 2003/4) + 183 + 30 - 730530$$

$$D = 734734 - (14021/4) + 183 + 30 - 730530$$

$$D = 734734 - 3505 + 183 + 30 - 730530$$

$$D = 912$$

Com o acréscimo do horário, em formato de fração do dia, a data base para os cálculos torna-se:

$$D = 912 + \frac{\text{hora} + \frac{\text{minutos} + \frac{\text{segundos}}{60}}{60}}{24}$$

$$D = 912 + \frac{14 + \frac{0 + \frac{0}{60}}{60}}{24}$$

$$D = 912,5833$$

Seguem os resultados dos elementos orbitais:

$$\omega_o = 282,9833^\circ$$

$$\alpha_o = 1$$

$$e_o = 0,0167079$$

$$M_o = 1255,4894^\circ$$

Para evitar problemas numéricos, M_o deve ter o valor reduzido entre 0 e 360° , logo, $M_o = 175,4894^\circ$, o que também deve acontecer para todos os valores mensurados em graus.

$$o_{ecl} = 23,4389^\circ$$

$$\overline{L_o} = 98,4727^\circ$$

$$E_o = 175,5634^\circ$$

As coordenadas retangulares do Sol são:

$$x_o = -1,0137$$

$$y_o = +0,0773$$

Convertidas em distância e anomalia verdadeira tornam-se, respectivamente:

$$r_o = 1,0166$$

$$v_o = 175,6368^\circ$$

A longitude do Sol é facilmente calculada:

$$L_o = 98,6202^\circ$$

Assim, é possível recalculas as coordenadas retangulares eclípticas do Sol:

$$x_o = -0,1523$$

$$y_o = 1,0051$$

$$z_o = 0$$

A rotação dessas coordenadas, utilizando a referência de o_{ecl} , converte-as para coordenadas equatoriais:

$$x_e = -0,1523$$

$$y_e = 0,9222$$

$$z_e = 0,3998$$

Que finalmente, permitem calcular as informações necessárias para o apontamento:

$$RA = 99,3822^\circ = 6 \text{ h } 37 \text{ min } 31 \text{ s}$$

$$DEC = 23,1586^\circ = 23 \text{ h } 9 \text{ min } 31 \text{ s}$$

A.2 Função arctg2

Esta função converte um par de coordenadas x,y no correto ângulo dentro dos quatro quadrantes. Em algumas linguagens, tais como Fortran, C e C++, a função **arctg2()** ou **atan2()** já está presente na biblioteca. Contudo, para linguagens que não tem essa base, segue o descritivo.

arctg2(y,x)

Se $x > 0$ **então** $\text{arctg2}(y,x) = \text{arctg}(y/x)$

Se $x < 0$ **então** $\text{arctg2}(y,x) = \text{arctg}(y/x) \pm 180^\circ$

Se $x=0$ então $\text{sign}(y) * 90^\circ$

APÊNDICE B

Radiação Solar

Esse texto trata do equacionamento envolvendo a radiação solar para superfícies inclinadas, radiação extraterrestre, índices de claridade e de concentração máxima, duração do dia, os horários do nascer e do pôr do sol. Dispõe também, da análise matemática do ângulo de incidência em superfícies fixas e em movimento.

Radiação em Superfícies Inclinadas

Para o cálculo da radiação horária sobre uma superfície inclinada de um coletor usando medições ou estimativas de radiação solar na superfície horizontal, utiliza-se o fator geométrico, R_b , que é a razão da radiação na superfície inclinada (G_{bT}) com a radiação na superfície horizontal (G_b), em qualquer instante, o que pode ser feito pela Equação (B.1).

As superfícies com inclinação β , têm a mesma relação angular de radiação que uma superfície horizontal a uma latitude genérica, ou seja, $\phi - \beta$ para o hemisfério Norte e $\phi + \beta$ para o hemisfério Sul.

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos \delta \cos (\phi \mp \beta) \cos \omega + \sin (\phi \mp \beta) \sin \beta}{\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (\text{B.1})$$

Radiação Extraterrestre

A maioria dos cálculos que envolvem radiação supõe níveis normalizados, ou seja, níveis teóricos da radiação considerando a inexistência da atmosfera. Para isso, é necessário

o uso de métodos que calculem a radiação extraterrestre. Em algum ponto no tempo, a radiação solar incidente fora da atmosfera, num plano horizontal, é dada pela Equação (B.2) descrita por Duffie e Beckman (2013), para qualquer instante entre o nascer e o pôr do sol.

$$G_o = G_{SC} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi) \quad (B.2)$$

Em que G_{SC} é a constante solar e n é o número do dia do ano. Integrando a Equação (B.2) tem-se a radiação solar extraterrestre diária na superfície horizontal, H_o , em J/m^2 para um período de insolação de um dia:

$$H_o = \frac{24 \times 3600 G_{SC}}{\pi} \left\{ \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \frac{2\pi\omega_s}{360} \sin \delta \sin \phi \right] \right\} \quad (B.3)$$

Sendo que ω_s está em graus, originário da Equação (B.4).

$$\cos \omega_s = -\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta \quad (B.4)$$

Caso seja necessário calcular a radiação em uma superfície horizontal para o período de uma hora, a integração da Equação (B.3) para o período definido em ângulo hora ω_1 e ω_2 será:

$$I_0 = \frac{12 \times 3600 G_{SC}}{\pi} \left[\left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left(\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \sin \delta \sin \phi \right) \right] \quad (B.5)$$

Índice de Claridade Horário e Diário

O índice de claridade diário (K_T) é a razão entre a radiação solar total de um dia H com a radiação solar extraterrestre no mesmo dia H_o , conforme a Equação (B.6). As duas são mensuradas em uma superfície plana.

$$K_T = \frac{H}{H_o} \quad (B.6)$$

A relação entre a radiação total I e a radiação extraterrestre I_0 , ambas horárias e no plano horizontal, determina o valor do índice de claridade horário atmosférico (k_T), conforme mostra a Equação (B.7):

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (\text{B.7})$$

Duração do Dia, Nascer do Sol e Pôr do Sol

A duração em horas da luz solar (N), para um determinado dia do ano, pode ser calculado pela Equação (B.8). Já a hora do nascer do Sol (ω_{ns}) e do pôr-do-sol (ω_{ps}), ou seja, quando $\theta_z = 90^\circ$, em horas, é calculada pelas Equações (B.9) e (B.10), respectivamente.

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\operatorname{tg} \phi \operatorname{tg} \delta) \quad (\text{B.8})$$

$$\omega_{ns} = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad (\text{B.9})$$

$$\omega_{ps} = 12 + \frac{\omega_s}{15} \quad (\text{B.10})$$

Em que ω_s pode ser encontrado conforme a correlação da Equação (B.4).

Ângulo de Incidência em Superfícies Fixas

O ângulo de incidência da radiação direta, θ , pode ser encontrado através da Equação (B.11) que é global, atendendo superfícies horizontais ou inclinadas correlacionando os ângulos da declinação (δ), da latitude (ϕ), da inclinação do coletor (β), do ângulo horário (ω) e do azimute de superfície (γ):

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi \cos \beta - \operatorname{sen} \delta \cos \phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \operatorname{sen} \beta \operatorname{sen} \gamma \operatorname{sen} \omega \end{aligned} \quad (\text{B.11})$$

Para superfícies fixas inclinadas direcionadas para o Sul ou para o Norte, o ângulo azimutal da superfície γ é igual a 0° ou 180° , o que anula o último termo. No caso de

superfícies verticais ($\beta = 90^\circ$), a Equação (B.11) torna-se:

$$\cos \theta = -\sin \delta \cos \phi \cos \gamma + \cos \delta \sin \phi \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \gamma \sin \omega \quad (\text{B.12})$$

Já para superfícies horizontais $\beta=0^\circ$, o ângulo de incidência é um ângulo zênite solar ($\theta = \theta_z$) transformando a Equação (B.11) em:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi \quad (\text{B.13})$$

Ângulo de Incidência para Superfícies em Movimento

Alguns coletores se movem acompanhando a direção dos raios solares. Os movimentos podem ser modelados utilizando um eixo (sentido leste-oeste, Norte-Sul ou paralelo ao eixo terrestre) ou dois eixos. Segundo Eibling *et al.* (1953) as seguintes equações são utilizadas para:

- Um plano móvel a partir de um eixo horizontal leste-oeste, com um único ajuste ao meio dia solar:

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cos \omega \quad (\text{B.14})$$

- Um plano móvel a partir de um eixo horizontal leste-oeste, com ajuste contínuo:

$$\cos \theta = \left(1 - \cos^2 \delta \sin^2 \omega \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.15})$$

- Um plano móvel a partir de um eixo horizontal Norte-Sul, com ajuste contínuo:

$$\cos \theta = \left[(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega)^2 + \cos^2 \delta \sin^2 \omega \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.16})$$

- Um plano móvel a partir de um eixo Norte-Sul com sentido paralelo ao eixo terrestre e ajustes contínuos:

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (\text{B.17})$$

- Um plano com eixo duplo orientado continuamente para a face do Sol:

$$\cos \theta = 1 \quad (\text{B.18})$$

Índice de Concentração Máximo

A taxa de concentração máxima, considerando um sistema ideal, baseado-se na segunda lei da termodinâmica e nas correlação entre o Sol e a Terra é apresentada por Duffie e Beckman (2013) pela Equação B.21, para concentradores com foco pontual (3d).

$$\left(\frac{A_a}{A_{abs}} \right)_{max,3d} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s} \quad (\text{B.19})$$

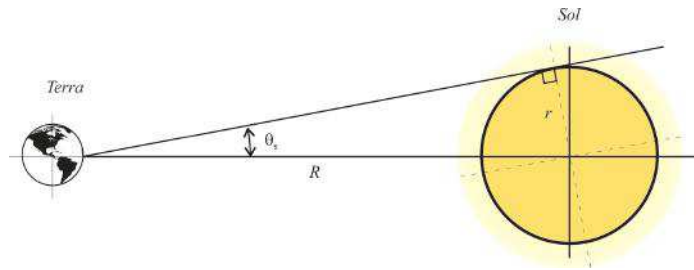


Figura B.1: Correlação entre o Sol e a Terra.

Sendo θ_s , obtido pela Equação (B.20), que é a razão entre o raio do Sol (r) com a distância entre o Sol e a Terra (R), ilustrado na Figura B.1.

$$\theta_s = \text{tg}^{-1} \frac{r}{R} \quad (\text{B.20})$$

Para concentradores solares com foco linear (2d), segundo Kreider e Kreith (1981), a concentração máxima é dado pela Equação B.21.

$$\left(\frac{A_a}{A_{abs}} \right)_{max,2d} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin \theta_s} \quad (\text{B.21})$$

Todavia, para concentradores não ideais, a concentração máxima possível é dada pela Equação (B.22), para focos pontuais e pela Equação (B.23), para focos lineares. Sendo que n_m é o índice de refração do meio (CHAVES, 2008).

$$C_{max,3d} = \frac{n_m^2}{\sin^2 \theta_{lim}} \quad (\text{B.22})$$

$$C_{max,2d} = \frac{n_m^2}{sen\theta_{lim}} \quad (B.23)$$

APÊNDICE C

Propriedades Termofísicas do Ar

C.1 Regressão Polinomial

Com a finalidade de implementar uma simulação computacional que envolvesse as propriedades termofísicas do ar à pressão atmosférica, foi proposto as seguintes regressões polinomiais de quarta e quinta ordem com base na Tabela C.1, adaptada de Incropera e DeWitt (2014), em uma faixa de temperatura entre 250 K e 500 K.

Tabela C.1: Propriedades termofísicas do ar à pressão atmosférica.

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p kJ/kg.K	$\mu \cdot 10^7$ N.s/m ²	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	$k \cdot 10^3$ W/(m.K)	Pr
250	1,3947	1,006	159,6	11,44	22,3	0,720
300	1,1614	1,007	184,6	15,89	26,3	0,707
350	0,995	1,009	208,2	20,92	30,0	0,700
400	0,8711	1,014	230,1	26,41	33,8	0,690
450	0,774	1,021	250,7	32,39	37,3	0,686
500	0,6964	1,03	270,1	38,79	40,7	0,684

As regressões polinomiais são ilustradas na Figura C.1 e as equações adotadas são, de maneira simplificada, expressas à seguir. Os coeficientes de determinação (r^2) da densidade e da viscosidade dinâmica foram iguais a 1, as demais expressões foram completamente ajustadas, ou seja, isentas de erro.

$$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 5,014 - 0,028T + 7,834 \cdot 10^{-5}T^2 - 1,065 \cdot 10^{-7}T^3 + 5,7 \cdot 10^{-11}T^4 \quad (C.1)$$

$$c_p \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 0,232 + 0,01T - 5,91 \cdot 10^{-5}T^2 + 1,58 \cdot 10^{-7}T^3 - 2,07 \cdot 10^{-10}T^4 + 1,07 \cdot 10^{-13}T^5 \quad (C.2)$$

$$\mu \left[\frac{N.s}{m^2} \right] = \frac{28,95 + 0,458T + 6,333 \cdot 10^{-4}T^2 - 1,837 \cdot 10^{-6}T^3 + 1,333 \cdot 10^{-9}T^4}{10^7} \quad (C.3)$$

$$k \left[\frac{W}{m.K} \right] = \frac{-248,6 + 3,6T - 0,02 \cdot 10^2T^2 + 5,27 \cdot 10^{-5}T^3 - 7,07 \cdot 10^{-8}T^4 + 3,73 \cdot 10^{-11}T^5}{10^3} \quad (C.4)$$

$$\nu \left[\frac{m^2}{s} \right] = \frac{44,09 - 0,62T + 0,003T^2 - 9,55 \cdot 10^{-6}T^3 + 1,27 \cdot 10^{-8}T^4 - 6,67 \cdot 10^{-12}T^5}{10^6} \quad (C.5)$$

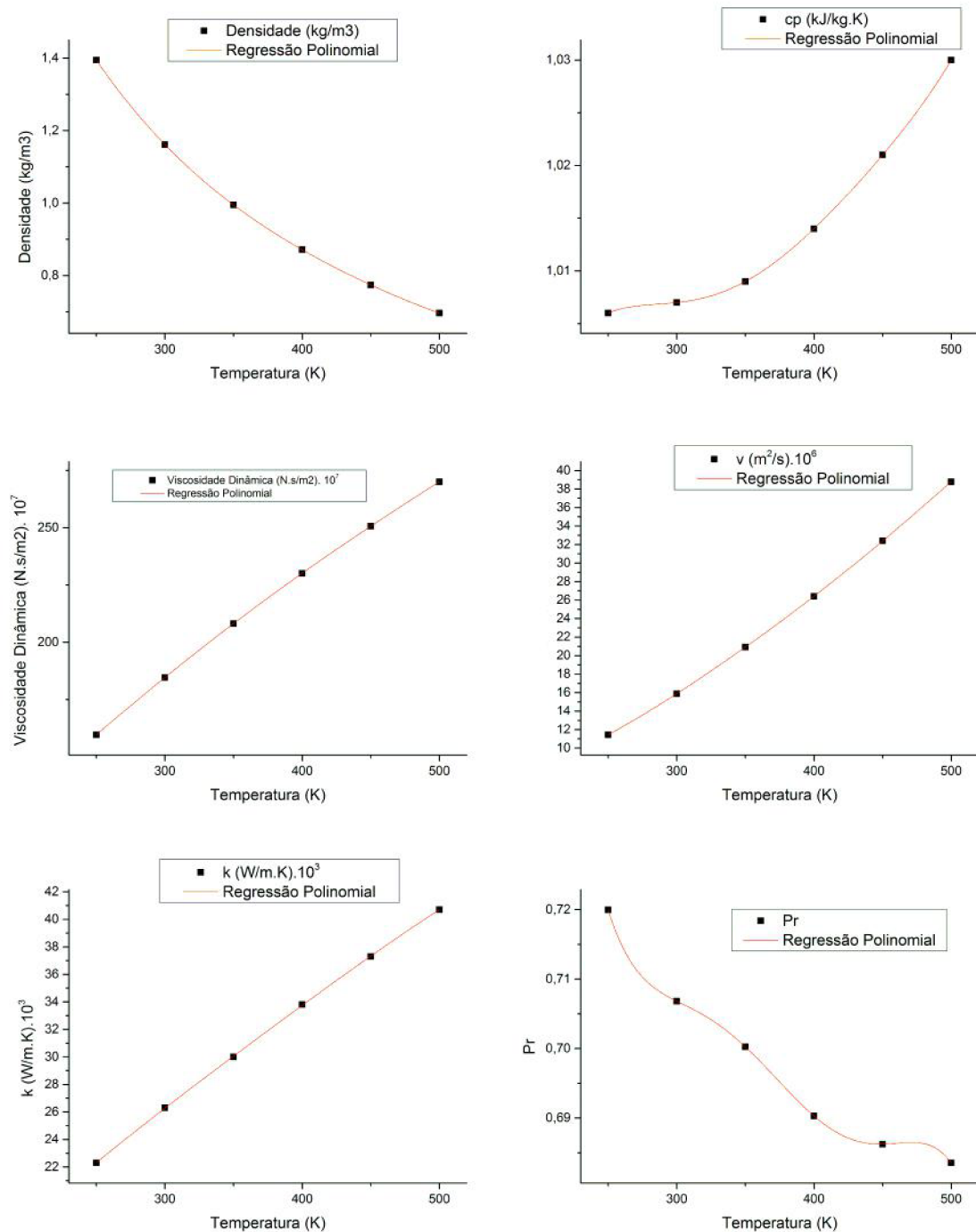


Figura C.1: Regressões polinomiais das propriedades termofísicas do ar.

APÊNDICE D

Declinação Magnética

A Figura D.1 é uma referência cartográfica da declinação magnética média de 2015. Cada intervalo de linha possui 2° , sendo que as vermelhas são positivas (leste) e as azuis, negativas (oeste). As linhas verdes correspondem à declinação nula.

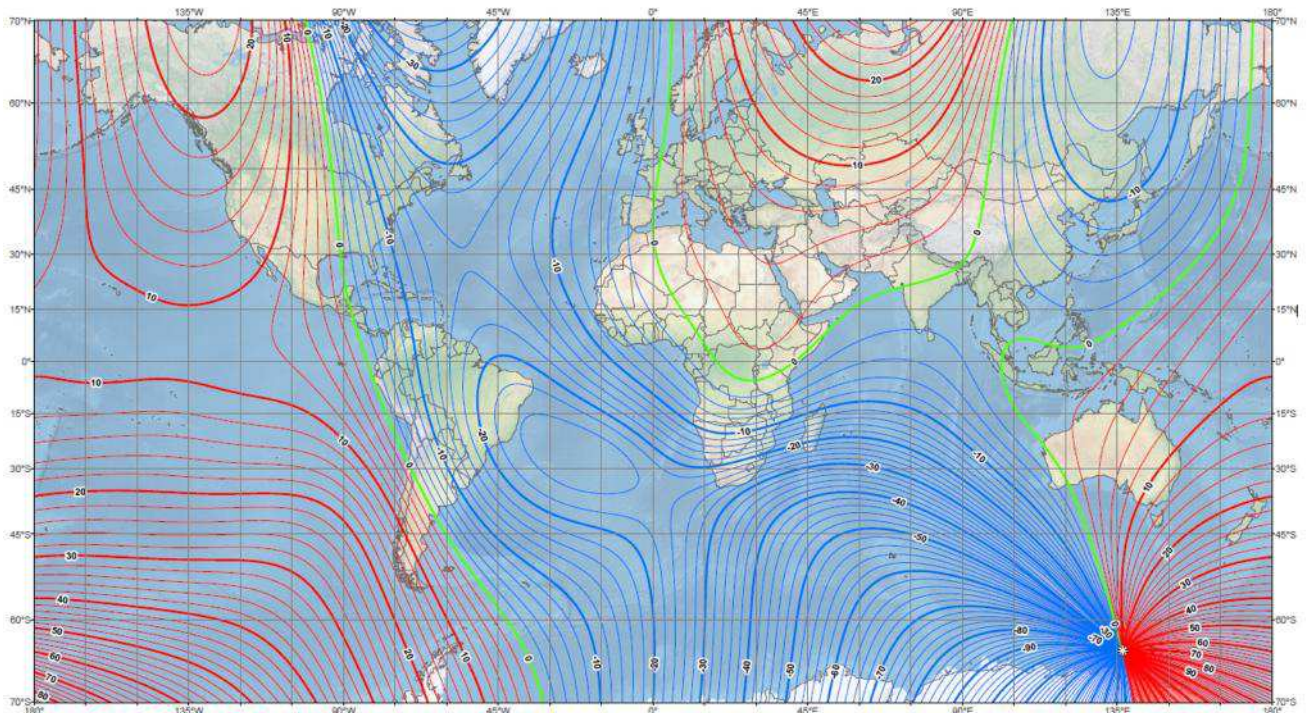


Figura D.1: Declinação magnética média, adaptado de NOAA (2014).

APÊNDICE E

Unidades Experimentais

Neste apêndice são apresentadas as fotografias das duas unidades experimentais construídas, ou seja, do Concentrador Solar de Disco à esquerda da Figura E.1 e do Concentrador Solar de Lente de Fresnel à direita.



Figura E.1: Unidade experimental do Concentrador Solar de Disco e da Lente de Fresnel.